hpt

(11) Na Natrium 22.989770 2 8 1

(74) W Wolfram 183.84 2 8 18 32 12 2

(53) I Iod 126.90447 2 8 18 18 7

FERTL
MATZNER

1

NATURWISSENSCHAFTEN FÜR HTL

NEU+

BILDUNGSSTANDARDS

KOMPETENZORIENTIERT

FERTL
MATZNER

Na W I

(11) Natrium 22.989770 — (74) Wolfram 183.84 — (53) Iod 126.90447

NATURWISSENSCHAFTEN für HTL 1

Grundlagen der Physik

Verlag Hölder-Pichler-Tempsky GmbH, Wien
www.hpt.at

Mit Bescheid des Bundesministeriums für Unterricht, Kunst und Kultur mit GZ 5.034/0017-Präs. 8/2011 vom 24. Oktober 2011 gemäß den derzeit geltenden Lehrplänen als für den Unterrichtsgebrauch für den I. Jahrgang an höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten im Unterrichtsgegenstand Naturwissenschaften geeignet erklärt.

Schulbuchnummer: 155016

Die Autoren und der Verlag bitten, alle Anregungen und Vorschläge, die dieses Lehrbuch betreffen, an folgende Adresse zu senden:
Verlag Hölder-Pichler-Tempsky GmbH
1090 Wien, Frankgasse 4
E-Mail: service@hpt.at

Bildquellen:
5 Fotolia, ag visuell; 8.1, 93.2, 141.1, 141.2, 144.1, 145.3 Wikimedia Commons; 9.1 Fotolia, Rhombur; 10.5 Frankfurter Allgemeine Zeitung, 21. Juli 2010; 11.1 The New York Times, 6. Februar 2006; 14.1, 136.1 ESA; 15.1 lo; 15.3, 15.4, 90.3 CERN; 23.1 Bill Watterson, Universal Press Syndicate; 26 Fotolia, Androm; 32.4, 39.4 Deutsches Museum, München; 38.1 Fotolia, fotofuerst; 38.2 Ruedi Fürst, Frauenfeld; 41.2 The Red Bulletin, Oktober 2009; 43.1 Fotolia, Wesel; 44.1 Universität Erlangen, Institut für medizinische Physik; 45.1 Fotolia, ingenium-design.de; 47.2 Martin Perscheid (Bulls); 54.2 Fotolia, pikealot; 60 Fotolia, Franz Pfluegl; 67.1 Fotolia, Lulla; 68.1 Sports Illustrated, 25. Juli 1988; 68.2, 68.3, 90.4-6, 107.1, 122.1, 122.2, 135.2, 139.1, 149.1, 151.1, 151.2 NASA; 69.1, 79.2, 82.1, 86.1, 130.1 APA; 69.3 Tiergarten Schönbrunn; 69.5 Fotolia, Stefan Thiermayer; 70.3 CERN COURIER, Jänner/Februar 2011; 71.1 Salzburger Nachrichten, 18. März 2010; 75.3 Fotolia, ewolff; 76.1 Fotolia, braverabbit; 80.1 Fallturm Bremen; 84.1 Fotolia, PRILL Mediendesign; 86.2 Salzburger Nachrichten, 02. Februar 2005; 88 Fotolia, Freefly; 96.1 Fotolia; Stefan Schurr; 97.3 Fotolia, Jeanette Dietl; 98.2 ÖAMTC; 98.3 Die Presse; 101.1 Fotolia, Eisenhans; 104.1 Fotolia, schaltwerk; 104.2 Photocase, tomogul; 107.3 The Red Bulletin, März 2011; 116 Fotolia, Maik Zeuge; 119.1 René Goscinny/Albert Uderzo; 121.2 Fotolia, Wolfgang Berroth; 122.4 Fotolia, foto.fritz; 130.4 Jim Davies, United Features Syndicate; 132.2 Fotolia, mtrommer ; 132.4 Johnny Hart; 142 Fotolia, Li-Bro; 143.2 Planetarium Wien; 145.2, 145.4 Collins: Physics; 147.2 ESO; 148.1 CNS; 152 Fotolia, Hennie Kissling; 159.2 Müller: Grundriss der Physik; 161.1 Dik Browne; 169.4 Fotolia, Guido Schmidt

1. Auflage, Nachdruck 2015 (1,02)

Satz: Nicole Böhm, Exakta GmbH, Wien
Technische Zeichnungen: Dr. Peter Löffler
Illustrationen: Andreas Slama, Hausbrunn
Druck und Bindung: Brüder Glöckler GmbH, Wöllersdorf
ISBN 978-3-230-03498-4

Liebe Schülerin! Lieber Schüler!

Der Band „Grundlagen der Physik" soll eine Lern- und Unterrichtshilfe für den Naturwissenschaftsunterricht vor allem an technischen Schulen sein. Wir haben versucht, das Buch so zu konzipieren, dass es auch fachübergreifend eine Ergänzung sein kann. Für eine Fortbildung im Fachenglisch müsste das Buch durch seine vielen englischen Ausdrücke und Beispiele ebenfalls wertvolle Hilfe leisten.

Merk & Würdig

Unter **Merk&Würdig** findest du das Wichtigste des jeweiligen Abschnitts auf einen Blick. Zusammen mit den orange unterlegten Merksätzen und Formeln soll dir diese Zusammenstellung das Lernen erleichtern.

Übungen

Übungen sollen dir helfen zu überprüfen, ob du die verschiedenen Kompetenzen bereits erworben hast: analysieren, abschätzen, darstellen, berechnen und vieles mehr. Hier findest du Testfragen zum Ankreuzen, Lückentexte und weitere Übungen. Sie machen, wie sich zeigt, beim Lösen durchaus Spaß. Natürlich ist bei einer technischen Ausbildung das Ermitteln von Ergebnissen mit Hilfe der Mathematik notwendig. Unter den zahlreichen anwendungsorientierten Rechenübungen entdeckst du sicher auch Aufgaben zu einer Thematik, die dich interessiert!
TIPP: Am Ende des Buches findest du einen Lösungsteil!

Thema & Gesellschaft

Unter **Thema&Gesellschaft** findest du Themen, die dich zum Nachdenken über gesellschaftliche und wirtschaftliche Erkenntnisse anregen sollen, sodass du dir leichter eine politische Meinung bilden kannst. Sie „dürfen" auch in anderen Gegenständen, z. B. Religion, diskutiert werden …

Ergänzung & Ausblick

Ergänzung und Ausblick: Unter diesem Logo werden Vertiefungen und Erweiterungen gebracht, die nicht als Lernstoff für den Regelunterricht gedacht sind. Da findet sich Interessantes für Neugierige oder auch Brauchbares zur Vorbereitung von Referaten.

Experiment

Experimente stehen im Zentrum der naturwissenschaftlichen Methode. Unter dem Logo mit dem Papierflieger findest du

- historische Experimente,
- Experimente, die deine Nawi-Lehrerin oder dein Nawi-Lehrer vorzeigen kann,
- Experimente, die du selber durchführen kannst.

Beispiel

Das Buch enthält unter dieser Rubrik zahlreiche ausführlich ausgeführte **Musterbeispiele**. Hier bekommst du Hilfe und gute Tipps!

In diesem Buch findest du kaum Hinweise auf Internetseiten. Dies hat einen Grund darin, dass solche Adressen oft keine lange Aktualität besitzen, außerdem kommst du ja mit Suchmaschinen oft schneller zum Ziel (Stichworte, auch in englischer Sprache, findest du im Buch genug).

Viel Erfolg wünschen die Autorin und der Autor!

TIPP: Bewahre das Buch für spätere Jahre zum Nachschlagen auf!

Die Autorin und der Autor danken Ursula Matzner (Illustrationen)

Inhalt

1 GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel geht es um

- **die Arbeitsweise der Naturwissenschaften**
- **die Auswirkung auf die Gesellschaft und kritisches Hinterfragen**
- **die Entwicklung naturwissenschaftlicher Weltbilder**
- **die Definition und Messung von naturwissenschaftlichen Größen**
- **das internationale Einheitensystem**
- **Idealisierung**

„Die Naturwissenschaften sind der Versuch, bei der Beschreibung der Natur ohne Wunder auszukommen."
HOIMAR VON DITFURTH (1921 – 1989)

„Alles, was messbar ist, messen; was nicht messbar ist, messbar machen."
GALILEO GALILEI (1564 – 1642)

GALILEVS GALILEI FLORENTINVS ANNVM AGENS LXXVIII

Abb. 6.1 *GALILEO GALILEI*

„Stimmt das Ergebnis nicht mit dem Experiment überein, war die Annahme falsch."
RICHARD FEYNMAN (1918 – 1988)

„Everything should be made as simple as possible but not simpler."
ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955)

OCKHAMs[1] Rasiermesser:
Darunter versteht man die Forderung, alles unwesentliche Beiwerk einer Erklärung wie mit einem Rasiermesser „abzuschneiden".

1.1 Die naturwissenschaftliche Methode *(the scientific method)*

Die Naturwissenschaften versuchen, die **Gesetzmäßigkeiten der Natur** zu beschreiben.

Wir beobachten fallende Regentropfen, wir sehen Vögel in der Luft segeln, staunen über das Blau des Himmels und fürchten uns vielleicht vor dem Blitz. Wir kennen die magnetische Wirkung und nützen die Kraft des elektrischen Stroms usw.

Ausgehend von diesen Erfahrungen und **Beobachtungen** ordnen Physiker/innen sie in folgende Teilbereiche. (Die Grenzen sind allerdings nicht scharf gezogen.)

- Mechanik
- Wärmelehre
- Optik
- Elektrizität und Magnetismus
- Aufbau der Materie

Die heutige Methode, Probleme zu lösen und Phänomene zu erklären, wurde um 1600 von Galileo Galilei begründet. Er wies dem **Experiment** eine entscheidende Rolle bei der Erforschung der Natur zu und zeigte auch die Bedeutung von **mathematisch beschreibbaren Modellen**.

Abb. 6.2 *Vereinfachter Weg von der Beobachtung zur Theorie*

Menschen, die sich mit Naturwissenschaften beschäftigen, sind neugierig. Sobald sie etwas Neues, Ungewöhnliches beobachten, versuchen sie, das Gesehene zu verstehen. Sie fragen nach dem **Wie** und **Warum**.

Naturwissenschaftler/innen wollen sich ein **Modell** (Bild) von der Wirklichkeit machen und stellen eine **Hypothese** (Vermutung) auf.

Mit Hilfe von **Experimenten** überprüfen sie ihr Modell und stellen eine **Prognose** auf.

[1] WILLIAM OF OCKHAM (ca. 1285 – 1347), englischer Franziskaner; er lehrte einen radikalen Empirismus.

Trifft die Prognose zu, so ist die Hypothese zu einer **Theorie** geworden. Trifft sie nicht zu, muss wieder – jetzt mit einer neuen – Hypothese begonnen werden. Alle diese Schritte sind vorläufig, denn das Wissen schreitet voran.

Der Kreislauf Beobachtung – Hypothese – Experiment – Theorie – Modell – Prognose (Vorhersage) – Beobachtung – Hypothese – … **(Abb. 6.2)** hat immer wieder dazu geführt, dass traditionelle Modelle und Denkmuster geändert werden mussten (man spricht dann von einem **Paradigmenwechsel**), da sie mit den Beobachtungen nicht mehr übereinstimmten.

In diesem Zusammenhang stellt sich die wesentliche Frage, wie viel **Vereinfachung** gerade noch erlaubt ist, ohne dass die Erklärung falsch wird oder unbrauchbare Ergebnisse liefert (siehe auch Kapitel 1.6).

Andererseits sollte das Modell nicht unnötig kompliziert sein, weil sonst das Wesentliche nicht (mehr) erkennbar ist.

Von der Beobachtung zur Theorie

Zeitlicher Ablauf	Zugehörige Frage/ Feststellung
Beobachtung	Was sehe/höre/messe ich?
Hypothese (Vermutung)	So könnte es sein!
Prognose (Voraussage)	Das erwarte ich.
Experiment (Versuch)	Jetzt versuche ich es!
Modell	Ist es wirklich so?
(neuerliche) Beobachtung	Es scheint zu stimmen!
	JA
Theorie	Jetzt arbeite ich damit!

NEIN (Rückführung von „Es scheint zu stimmen!“ zu „Was sehe/höre/messe ich?“)

Abb. 7.1

Geht man die Arbeitsaufträge von Beobachtung bis zu einer neuerlichen Beobachtung durch, so ergibt sich bei einem NEIN ein Kreislauf wie in **Abb. 6.2** dargestellt. Aber auch bei einer (gesicherten) Theorie ergeben sich Fragen, und wir landen wieder bei einer neuen Beobachtung …

Auf Seite 8 wird der Weg von der Beobachtung zur Theorie an einem Beispiel dargestellt.

Diese Übersicht zeigt dir, wie seit mehr als 2 000 Jahren versucht wird, die Stellung der Erde im Weltall zu erklären.

Der Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild ist ein Paradigmenwechsel.

Technische Anwendungen

Das Wissen dient und diente den Naturwissenschaftler/innen nicht nur zum Erkenntnisgewinn, sondern wurde und wird natürlich auch dazu genutzt, um

- sich das Leben zu erleichtern (Hebelgesetze),
- Krankheiten zu diagnostizieren (Röntgenstrahlen, Magnetresonanz) und zu heilen (Bestrahlung, Laserbehandlung),
- Informationen auszutauschen (Satelliten, Halbleiter, LCD[1], LED[2]) und
- Energie zu „erzeugen“ (Kernkraftwerke, ITER[3]),
- leider auch im militärischen Bereich angewendet zu werden.

Im Laufe des Studiums der Naturwissenschaften werden wir immer wieder auf derartige Anwendungen stoßen.

Leider gibt es zu jeder gewünschten Anwendung auch die Möglichkeit des Missbrauchs, des Entgleitens der technischen Möglichkeiten oder des Überschreitens von Grenzen.

„Unsere Wissenschaft ist schrecklich geworden, unsere Forschung gefährlich, unsere Erkenntnis tödlich. Es gibt für uns Physiker nur noch die Kapitulation vor der Wirklichkeit. Wir müssen unser Wissen zurücknehmen …“

Aus: „Die Physiker“ von FRIEDRICH DÜRRENMATT (1921 – 1990)

[1] LCD = Liquid Crystal Display (= Flüssigkristallbildschirm)
[2] LED = Light Emitting Diode (= Licht aussendende Diode)
[3] ITER = International Thermonuclear Experimental Reactor; Projekt der EU, Energie mittels Kernfusion zu gewinnen („iter“, lat. = „der Weg“)

Von der Beobachtung zur Theorie an einem Beispiel

Der Weg zum geozentrischen Weltbild			
Beispiel		**Erklärungsversuch**	**Zeitlinie**
Beobachtung		Die Bewegung der Wandelsterne (die man jetzt Planeten nennt).	
Hypothese		**Abb. 8.1** *Helios fährt mit dem Sonnenwagen über den Himmel. Die antiken Griechen zählten die Sonne zu den 7 Wandelsternen.*	**Klassisches Griechenland**
Neuerliche Beobachtung und Messung	Wissen geht verloren	Die Erde kreist um Sonne.	Aristarch von Samos, um 300 v. Chr.
Neues Modell geozentrisches Weltbild		Die Sonne kreist um Erde.	Ptolemäus, um 150 n. Chr.
Nochmals verbessertes Modell	genauere Messung	Epizykel **Abb. 8.2** *Die beobachteten Abweichungen der Planetenbahnen erklärte Ptolemäus durch ein System von übereinander gelegten Kreisbahnen (Epizyklen): Ein Planet bewegt sich demnach auf einer Kreisbahn, deren Mittelpunkt selbst auf einer Kreisbahn um die Erde läuft.*	ab 300 v. Chr. bis Kepler
Weitere Verbesserung heliozentrisches Weltbild	genauere Messung	**Abb. 8.3** *Sonne im Mittelpunkt; Erde auf Kreisbahnen* Kopernikus erklärte die unregelmäßige Bewegung der Planeten damit, dass die Planeten von der bewegten Erde aus betrachtet werden. Zieht die Erde etwa am Planeten Mars vorbei, so scheint der Mars vor dem Sternenhintergrund zurück zu bleiben (scheinbar rückläufige Bewegung des Mars). Kopernikus, um 1500	
Weitere Verbesserung		Die Erde bewegt sich auf einer elliptischen Bahn um die Sonne.	Kepler, um 1600
Aktuelles Modell		Gravitationstheorie	Einstein, 1916

Gesellschaftliche Verantwortung an Beispielen:

Die Naturwissenschaftler/innen, insbesondere den Physiker/innen und Chemiker/innen, haben eine hoheVerantwortung gegenüber der Gesellschaft. Es ist deren Pflicht, die positiven Seiten der Erkenntnis genauso der Gesellschaft mitzuteilen wie die Risiken. Wir sollten dadurch in die Lage versetzt werden, sich aus den aktuellen Themen in den Medien problemspezifische Informationen zu beschaffen, sie zu interpretieren und auf ihre Richtigkeit hin zu hinterfragen.

Thema & Gesellschaft

Thema Energiesparlampen

Test wirft trübes Licht auf Energiesparlampen

Zündsto˜ . Kein Modell kam an die Leistung einer normalen Glühbirne heran. Energiespareffekt weit geringer als angenommen.

Abb. 9.1 *Überschrift eines Artikels in den Salzburger Nachrichten vom 20. August 2009*

Leuchtdioden sind umweltfreundlich

München (SN). Leuchtdioden (LED) sind genauso umweltfreundlich wie Energiesparlampen und in ihrer Ökobilanz den Glühlampen deutlich überlegen. Das zeigt zumindest eine Studie, die der Lampenhersteller Osram zusammen mit Experten von Siemens Corporate Technology erarbeitet hat. Sie lassen ihre Ergebnisse derzeit auch noch von unabhängigen Gutachtern prüfen.

Nach der errechneten Ökobilanz verbraucht die neueste Generation von LED-Lampen mehr als 98 Prozent der insgesamt aufgewendeten Energie während des Betriebs und weniger als zwei Prozent bei der Produktion. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für Energiesparlampen ermittelt. Damit ist für die Hersteller die Annahme widerlegt, dass die Erzeugung der LED-Lampen energieintensiver sein könnte.

Damit Glühlampen mit LED verglichen werden können, hat Osram eine Lebensdauer von 25.000 Stunden gewählt. Die neueste LED-Lampengeneration erreicht diesen Wert.

Für die Herstellung der Glühlampen, die ab September 2009 sukzessive verboten werden, müssen etwa 3300 Kilowattstunden (kWh) Primärenergie aufgewendet werden. Für die LED sind es nur 700 kWh.

In der Ökobilanz von Osram Opto Semiconductors wird die Umweltwirkung einer LED-Lampe über ihren gesamten „Lebensweg" untersucht. Es wurden für alle Bestandteile und Herstellungsprozesse die Material- und Energieströme erhoben, auch die Transportwege. So wurde etwa auch der Weg vom Produktionsstandort China nach Europa eingerechnet.

Abb. 9.2 *Bericht in den Salzburger Nachrichten vom 6. August 2009*

Ein Schlag auf die Birne

Vom nächsten Dienstag an dimmt Brüssel den Kontinent. Alle 100-Watt-Glühbirnen und alle matten Glühlampen müssen dann aus den Ladenregalen verschwunden sein.

Abb. 9.3 *Überschrift und Beginn eines Berichts in der ZEIT vom 27. August 2009*

- Wie groß ist der prozentuelle Anteil des Energieverbrauchs von Glühlampen am Gesamtenergieverbrauch?
- Hätte man nicht gleich auf LEDs warten sollen?
- Wie denkst du darüber?

Thema & Gesellschaft

Thema Atommülllagerung

Atommüll-Berge rund um die Ostsee

Kernkraftwerke. *Ein Dutzend Kernkraftwerke wird in den Ostsee-Anrainerstaaten gebaut. Die Entsorgung des dort anfallenden Atommülls ist weitgehend ungeklärt.*

Abb. 10.1 *Bericht vom 29. November 2010 in Die Presse*

Atommüll. Energiekommissar Oettinger versucht erneut, in der EU echte Endlager für radioaktiven Müll zu schaffen. Davon hängt Europas Energieversorgung ab.

„Das wird ja nicht verbuddelt"

Abb. 10.2 *Bericht vom 4. November 2010 in Die Presse*

Frankreichs großer Nuklearschwindel

SKANDAL. Uran und Plutonium aus AKW heimlich in Sibirien entsorgt.

Abb. 10.3 *Bericht vom 15. Oktober 2009 in Die Presse*

Abb. 10.4 *Die in verglasten Fässern eingeschmolzenen Abfälle (schwache und mittelaktive) werden zur Endlagerung in Salzstöcken (= aufgelassene Salzbergwerke) aufgeschichtet.*

2008 wird in Asse (in der Nähe von Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland) radioaktiv strahlendes ^{137}Cs unter Tage gemessen. Vermutlich muss dieses Endlager geräumt werden, was Milliarden Euro kostet.

Erkundige dich, was mit hoch radioaktivem Müll passiert.

Was soll mit dem Müll in Asse **(Abb. 10.4)** geschehen? (PS: Auch die Regierung in Deutschland ist hier noch unschlüssig.)

- Was sind die Zukunftsaussichten?
- Wer übernimmt die Kosten?

Thema & Gesellschaft

Thema Wir bestehen aus Sternenstaub

Eine Fülle an organischen Molekülen

Von Herschel aufgenommenes Spektrum des Orionnebels, einem Foto des Spitzer-Weltraumteleskops überlagert

Abb. 10.5 *Dieses Spektrum wurde vom Satelliten Herschel aufgenommen, das Hintergrundbild lieferte der Satellit Spitzer.*

Wenn man die Frage „Woher kommen wir?" bzw. „Woraus bestehen wir?" beantworten will, muss man einiges an naturwissenschaftlichen Kenntnissen besitzen.

- Diskutiere dieses Thema auch im Religionsunterricht kritisch.

Thema & Gesellschaft

Thema Anwendungen der Physik als Vorwand zum Krieg

A World Without Secrets

How to Listen For the Sounds of Plutonium

By DAVID E. SANGER and WILLIAM J. BROAD

WASHIGNTON – In March 2004, the science and technology directorate of the Central Intelligence Agency called a secret meeting of hundreds of the government's top experts in nuclear intelligence to address a problem that had troubled Washington for decades: how to know, with precision, when a country is about to build an atomic bomb.

The aim of the two-day conference was to reinvigorate America's atomic espionage efforts, not with spies on the ground or satellites in space but with a new generation of advanced technologies meant to detect the faintest clues of nuclear activity.

The meeting, said an official who attended, "was to galvanize people to say, 'We recognize this is a big problem and we need to get everybody thinking about it.'"

"There was hope that, out of this, promising new approaches might be identified," the official said.

The experts discussed a range of potential tools, including new ways to monitor electric power lines for the signature of high-speed centrifuges as they purify uranium and lasers that can track radioactive dust. Also on the agenda were more fanciful items, like robotic butterflies that can monitor an atomic site while appearing to flutter by innocuously.

Nearly two years later, federal officials and scientists say that meeting and other secret actions have accelerated the government's efforts to develop new atomic espionage technologies. The research focuses on better detection of four basic, but inconspicuous, signatures that covert nuclear facilities and materials can emit: distinctive chemicals, sounds, electromagnetic waves and isotopes, or forms of the same element that have different numbers of neutrons, a subatomic building block.

Now, the Iranian crisis could pose a big test of how far that technology has come. At a minimum, the crisis is putting more pressure on intelligence agencies …

[Bildunterschrift im Artikel:] The world of espionage is increasingly a contest of technological prowess. A satellite image of a nuclear plant in Iran in 2002.

Abb. 11.1 *Extract from a report, February 6th 2006, The New York Times*

- Welche Meinung hast du zum Thema „Physik beeinflusst die Weltgeschichte"?

1945 wurde die erste Atombombe gezündet. Sie führte schließlich zum „Gleichgewicht des Schreckens" zwischen USA und UdSSR.

- Wie sieht es heute mit den Atomstaaten aus?

„Ich weiß nicht, mit welchen Waffen der Dritte Weltkrieg geführt wird. Aber ich weiß, mit welchen der Vierte geführt werden wird."
ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955)

Thema & Gesellschaft

Thema Kann man seinen Sinnen immer trauen?

Für uns Menschen ist Sehen eine Selbstverständlichkeit. Es hilft uns dabei, sich in der Welt zurecht zu finden. Doch unsere Wahrnehmung ist nicht immer perfekt. Betrachte die folgenden Bilder und versuche, ihnen auf die „Schliche" zu kommen.

- Nicht alles, was man sieht, gibt es; oder?

Abb. 12.1 *Was sieht man? Stäbe oder eine U-Form?*

Abb. 12.2 *Sind das zwei Würfel?*

Abb. 12.3 *Sind die Linien gleich lang?*

Thema & Gesellschaft

Thema Arbeitsweise der Naturwissenschaften

So arbeiten Naturwissenschaftler/innen! Arbeiten Naturwissenschaftler/innen so? Naturwissenschaftler/innen arbeiten so! *Wichtiger als die Antwort sind oft die Begründung und die Diskussion über die Richtigkeit oder Fehlerhaftigkeit der Behauptung!*

	richtig	falsch	Kann man nicht so sagen.
Mit einem Experiment will man eine Vermutung beweisen.			
Der Ausgang eines Experiments ist manchmal überraschend.			
Vermutung ist etwas anderes als Prognose.			
Die Vermutungen der Naturwissenschaftler/innen sind immer richtig.			
Das Wissen der Naturwissenschaftler/innen ist immer gültig.			
Vor der Planung eines Versuchs muss man wissen, was man zeigen/finden/messen will.			
Naturwissenschaftler/innen sind immer einer Meinung.			
Irgendwann einmal werden Naturwissenschaftler/innen alles wissen.			
Manchmal ist auch Fantasie notwendig, um etwas erklären zu können.			
Die Naturwissenschaften sind ohne Mathematik sprachlos.			
Der Ausgang eines Versuchs ist immer eindeutig.			
Zum Ausgang eines Experiments haben Naturwissenschaftler/innen oft unterschiedliche Meinungen.			
Alles Wissen ist vorläufig.			
Die Ergebnisse von Rechnungen sind auf Plausibilität zu prüfen.			
Persönliche Aussagen gelten nicht.			

Weitere Themenvorschläge:

- Gelten naturwissenschaftliche Theorien überall?
- Was versteht die Physik unter *erklären*?
- Sollen Experimente wiederholt werden? Warum?
- Hängen Theorie und Experiment zusammen? Wenn ja, wie?
- Was kann eine physikalische Theorie nicht erklären?
- Gibt es „Dinge", mit denen man nicht experimentieren kann bzw. soll?

Diskutiere nicht nur mit deiner Lehrkraft für Naturwissenschaften!

1.2 Größen und Einheiten – das internationale Einheitensystem

(physical quantities and units – the International System of Units)

Für die eindeutige Beschreibung von **Naturgesetzen** werden **physikalische Größen** verwendet. Mit ihnen lassen sich messbare Eigenschaften physikalischer Objekte, Zustände und Vorgänge beschreiben.

Alles, was man messen kann, ist somit eine **physikalische Größe**.

Jede physikalische Größe besteht aus Maßzahl mal Einheit.

Um Formeln einfacher schreiben zu können, ersetzen die Physiker die physikalischen Größen durch Buchstaben. Wesentlich beim Verstehen physikalischer Gesetze ist das Beherrschen dieser Abkürzungen.

Merk & Würdig

Eine physikalische Größe ist jede messbare Eigenschaft.

Eine Messung ist ein Vergleich mit einer bekannten Einheit.

Jede physikalische Größe besitzt eine Einheit.

Es gilt:

Physikalische Größe = Zahlenwert · Einheit	
$s = 60 \cdot \text{m}$	Die zurückgelegte Laufstrecke s eines Schülers: $s = 60$ m
$\rho = 1\,000 \cdot \text{kg/m}^3$	Die Dichte ρ von Wasser: $\rho = 1\,000$ kg/m³
$U = 230 \cdot \text{V}$	Die elektrische Spannung U im Haushalt: $U = 230$ V
Größe G = Zahl · [G]	

[G] … Die Einheit einer Größe schreibt man in eckige Klammern; z. B. [s] = m

Durch die Verwendung von Größen lassen sich verschiedene Vorgänge, Eigenschaften von Systemen oder Messergebnisse miteinander vergleichen. Ein derartiger Vergleich mit einer definierten, allgemein bekannten entsprechenden Einheit nennt man **Messung** (z. B. wurde als Einheit der Größe *„Länge"* das Meter eingeführt). Jede auftretende Strecke wird jetzt als Teil oder Vielfaches dieses Meters angegeben.

Vor 1972 gab es eine Fülle von Einheiten für ein- und dieselbe Größe. Z. B. gab es für die Länge die Einheiten Meile, Zoll, Elle, Yard, Inch usw.

1972 wurde eine allgemeine Normierung beschlossen, das **Internationale Einheitensystem** = SI (franz.: Système international). Es fasst alle Einheiten aller Größen zusammen. In der Mechanik kommt man mit drei Grundgrößen aus: Länge s, Zeit t, Masse m. In der Physik sind sieben Basiseinheiten notwendig **(Tabelle13.1)**. Alle anderen Einheiten lassen sich auf diese 7 Grundeinheiten zurückführen.

Beispiele dafür sind:

Geschwindigkeit $v = \frac{s}{t}$, Beschleunigung $a = \frac{v}{t}$,

Kraft $F = m \cdot a$, Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\varphi}{t}$

Arbeit $W = F \cdot s$, Leistung $P = \frac{W}{t}$,

Energiearten: $E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$, $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$

Basisgrößen		Basiseinheiten	
Länge	s	Meter	*m*
Zeit	t	Sekunde	*s*
Masse	m	Kilogramm	*kg*
Stromstärke	I	Ampere	*A*
Temperatur	T	Kelvin	*K*
Lichtstärke	I_v	Candela	*cd*
Stoffmenge	n	Mol	*mol*

Tabelle 13.1 *Die Basisgrößen und -einheiten des SI-Systems*

Länge *s* (in Meter) und Arbeitsbereiche der Physik

typische Arbeitsbereiche	*s* (m)	Beispiele
Kosmologie	10^{25}	Durchmesser des Universums
	10^{20}	Entfernung zur Andromeda-Galaxie Durchmesser der Milchstraße
Astrophysik	10^{15}	nächste Fixsterne 1 Lichtjahr
	10^{10}	Entfernung Erde – Pluto Entfernung Erde – Sonne
Technik und Alltag: Mechanik, Hydromechanik, Thermodynamik, Akustik, Optik, Elektrizität, Magnetismus	10^{5}	Sonnendurchmesser Entfernung Erde – Mond Jupiterdurchmesser Erddurchmesser Monddurchmesser Flughöhe Verkehrsflugzeuge
	10^{0}	höchste Wolken Mittelgebirge Sendemasten, hohe Türme Bäume, Häuser Mensch
	10^{-5}	kleinste Säugetiere Insekten Regentropfen
Festkörperphysik	10^{-10}	Bakterien, menschliche Blutzellen Wellenlänge des Lichts Moleküle, kleinste Viren Atomdurchmesser
Atomphysik; Astrophysik; Plasmaphysik; Kernphysik; Elementarteilchenphysik	10^{-15}	Atomkerndurchmesser
		derzeit kleinste messbare Länge

Makrokosmos / Mesokosmos / Mikrokosmos

Alltagserfahrung, Naturbeobachtung

3,5-m-Spiegelteleskop auf dem Calar Alto (Spanien) 25 m hoch, 40 Tonnen

Abb. 14.1 *Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von* $\frac{1}{299\,792\,458}$ *Sekunden durchläuft. (Bei dieser Definition des Meters wird der Lichtgeschwindigkeit der feste Wert* $c = 299\,792\,458$ *m/s zugeordnet. Somit folgt, dass die Längeneinheit Meter von der Zeiteinheit Sekunde abhängt).*

Beispiele	Gebiet	Zeit in s	Zeitspanne
Radioteleskope empfangen Signale, die vor 13,7 Milliarden Jahren ausgesendet wurden.	Kosmologie, Astrophysik	10^{20}	Alter des Universums: 1,4 · 10^{10} a
			Alter der Erde: 4,8 · 10^{9} a
		10^{15}	Dauer eines Umlaufes des Sonnensystems um das Milchstraßenzentrum: 3 · 10^{7} a
			Alter der Menschheit: 3 · 10^{6} a
			Alter der Geschichtsschreibung: 3 200 a
		10^{10}	durchschnittliche Lebenserwartung: 80 a
			Dauer eines Jahres: 1 a
Im Turnunterricht werden Zeiten mit einer Stoppuhr bestimmt.	Technik und Alltag: Mechanik, Hydromechanik, Thermodynamik, Akustik, Optik, Elektrizität, Magnetismus	10^{5}	Dauer eines Tages
			Lebensdauer eines freien Neutrons
		10^{0}	Herzschlag, Reaktionszeit
			Dauer einer Schallschwingung (hohes C)
		10^{-5}	Dauer eines elementaren Rechenvorganges im Computer
	Atomphysik, Kernphysik, Laserphysik		Zeit, die das Licht braucht, um 1 m zurückzulegen
		10^{-10}	Lebensdauer langlebiger Elementarteilchen
		10^{-15}	Dauer einer Lichtschwingung
Zur Erforschung der Elementarteilchen werden immer größere Beschleuniger notwendig.	Elementarteilchenphysik	10^{-20}	Aus der Länge der Teilchenspuren kann auf die Lebensdauer langlebiger Elementarteilchen geschlossen werden.
			Lebensdauer kurzlebiger Elementarteilchen, kürzeste derzeit nachweisbare Zeitspanne
		10^{-25}	

Legende: Alltagserfahrung, Naturbeobachtung

Abb. 15.1 *Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.*

Beispiele für

abgeleitete Einheiten

Einheit der Kraft: Newton *N*

Einheit der elektrischen Spannung: Volt *V*

Einheit des Drucks: Pascal *Pa*

Einheit der Arbeit: Joule *J*

Einheit der Leistung: Watt *W*

zusätzliche Einheiten

Stunde *h*

Grad Celsius ℃

Vorsätze (Multiplikatoren)

Vorsatz			Faktor
Giga	G	1 000 000 000	10^9
Mega	M	1 000 000	10^6
Kilo	k	1 000	10^3
Milli	m	0,001	10^{-3}
Mikro	µ	0,000 001	10^{-6}
Nano	n	0,00 000 0001	10^{-9}

Tabelle 16.1 *Auszug aus „Vorsätze und Potenzen" am Ende des Buchs*

Das SI-System besteht aus:

a) **Grundeinheiten**

Es gibt die sieben Basiseinheiten **(Tabelle 13.1)**.

b) **abgeleiteten Einheiten**

Diese sind Einheiten von abgeleiteten Größen (z. B. Kraft, Druck, Fläche, elektrische Spannung, etc.), die auf Grund ihrer Definition oder physikalischen Gesetzmäßigkeit durch eine Kombination von Grundgrößen festgelegt werden.

c) **zusätzlichen Einheiten**

Diese Einheiten passen nicht in das Schema des SI-Systems, werden aber aus historischen oder praktischen Gründen weiter verwendet.
Sie müssen gegebenenfalls in SI-Einheiten umgewandelt werden.

d) **den Vorsätzen (auch Multiplikatoren genannt)**

Um Vielfache oder Teile einer Einheit anzugeben, ist es üblich Vorsätze zu verwenden (**Tabelle 16.1**; am Ende des Buchs gibt es die vollständige Liste aller Vorsätze).

Merk & Würdig

- Jede physikalische Größe hat eine Abkürzung und ist genau festgelegt.
- Zu jeder physikalischen Größe gibt es eine SI-Einheit.
- Jede Einheit ist eindeutig definiert.
- Vorsicht!
  Ein Buchstabe kann Verschiedenes bedeuten, je nachdem, wo er steht:
  $m = 2$ kg — Hier bedeutet *m* eine Größe: die Masse
  $s = 2\ m$ — Hier bedeutet *m* eine Einheit: Meter
  $U = 2\ mV$ — Hier bedeutet *m* einen Vorsatz: milli
- Physikalische Gleichungen sind so gestaltet, dass die Einheiten der darin auftretenden Größen immer SI-Einheiten besitzen.
  Im Zweifel immer SI-Einheiten benützen.

Beispiel 1.1

0,65 MW sind wie viel Watt?

Lösungsweg:

Was ist die Grundeinheit? — Watt *W*

↓

Umwandlung des Vorsatzes in 10er-Potenzen — $M = 10^6$

Gleitkommadarstellung aus dem Mathematikunterricht anwenden (in der Physik wird die Einerstelle besetzt).

↓

Umwandlung des Betrags in Gleitkommadarstellung — $0{,}65 = 6{,}5 \cdot 10^{-1}$

z. B.
$0{,}78 = \underline{7}{,}8 \cdot 10^{-1}$
$6400 = \underline{6}{,}4 \cdot 10^{3}$

↓

„Zusammensetzen"

$0{,}65$ MW $= 6{,}5 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{6}$ W

0,65 MW = $6{,}5 \cdot 10^5$ W

Beispiel 1.2

a) 75 kV = ? V

b) 0,35 µm = ? m

a) $75 = 7{,}5 \cdot 10$ und $k = 10^3$
Also: 75 kV $= 7{,}5 \cdot 10 \cdot 10^3$ V $= 7{,}5 \cdot 10^4$ V

b) $0{,}35 = 3{,}5 \cdot 10^{-1}$ und $\mu = 10^{-6}$
Also: 0,35 µm $= 3{,}5 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-6}$ m $= 3{,}5 \cdot 10^{-7}$ m

Beispiel 1.3

Die Sonne hat eine Masse von $1{,}98 \cdot 10^{33}$ g; die Erde eine von $5{,}98 \cdot 10^{24}$ kg. Um wie viel ist die Masse der Sonne größer als die der Erde?

Zunächst müssen wir die beiden Einheiten „gleich machen“:

$m = 1{,}98 \cdot 10^{33}\ \text{g} = 1{,}98 \cdot 10^{30}\ \text{kg}$

$$\frac{m_{Sonne}}{m_{Erde}} = \frac{1{,}98 \cdot 10^{30} \cdot \text{kg}}{5{,}98 \cdot 10^{24} \cdot \text{kg}} = \mathbf{331\,103}$$

Die Sonne besitzt daher eine **rund 330 000-mal größere Masse.**

Abb. 17.1 *Projektion der Sonnenscheibe; im Größenvergleich dazu der Planet Jupiter und ganz klein darüber die Erde.*

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen durchführst, erwirbst du Fähigkeiten im Umgang mit Einheiten.

Ü 1.1 **a)** Die Wellenlänge des roten Lichts beträgt 800 nm. Wie viel Meter sind dies?

b) Ö3 besitzt eine Frequenz von fast 100 MHz. Rechne in Hertz[1] um.

c) 0,8 Tbyte sind wie viel Byte?

d) 17 dag sind wie viel kg?

Ü 1.2 **a)** 0,17 mW = ? W **c)** 95 nm = ? m

b) 34 kJ = ? J **d)** 700 kHz = ? Hz

Ü 1.3 Gibt es die olympische Disziplin eines Hektometer-Laufs?

Ü 1.4 In einem Waggon der Wiener U-Bahn **(Abb. 17.2)** gibt es offiziell 49 Sitzplätze und 91 Stehplätze.

a) Schätze ab, wie viele Waggons oder Garnituren der U-Bahn man braucht, um alle Schülerinnen und Schüler deiner Schule auf einmal unterzubringen. Wie groß wäre dann die Masse des gesamten Zugs, wenn das „Leergewicht“ eines Waggons 23,5 t beträgt?

b) Der Fahrgastraum ist 16 m lang und 2,8 m breit. Wie viel Fläche kommt dann auf jeden Fahrgast?

Ü 1.5 Wie viele Weihnachtskerzen werden wohl am Heiligen Abend in deinem Wohnort auf den Christbäumen brennen? Schätze realistisch.

Ü 1.6 Der Blutdruck wird in **Ü 1.15** (siehe Seite 21) in mm Hg angegeben. Rechne in Pa und bar um.

760 mm Hg ≈ 1 bar = 10^5 Pa

Ü 1.7 Der Verbrauch von Treibstoff wird in Europa üblicherweise in Liter/100km angegeben. In den USA gibt man an, wie weit man mit einem Liter Treibstoff fahren kann. Rechne jeweils in die im anderen Land gebräuchliche Angabe um.

a) 7,7 Liter/100 km

b) 1 Liter reicht für 8 km.

Abb. 17.2 *Eine Garnitur der Wiener U-Bahn besteht aus 6 Waggons.*

Abb. 17.3 *zu Ü 1.7*

[1] *Hz* … Hertz; Einheit der Frequenz; benannt nach HEINRICH HERTZ (1857 – 1894), deutscher Physiker.

Übungen

Ü 1.8 Im Rahmen einer Rechnung erhält eine Schülerin die Formel $\frac{p \cdot V}{k \cdot T} = ?$

Welche der folgenden Größen hat sie berechnet: Arbeit, Anzahl, Weg, Geschwindigkeit?
Hinweis: $[p] = N/m^2$, $[V] = m^3$, $[k] = J/K$, $[T] = K$

Ü 1.9 Alle 20 ms sendet ein Taktgeber ein Signal an einen Roboter.
Wie viele Signale werden in 1 s ausgesendet?

Ü 1.10 Womit misst man eine Länge, eine Zeit, eine Masse?

Ü 1.11 Was misst man mit den angeführten Geräten? Ordne richtig zu!

Schiebelehre	Kraft
Fahrtenschreiber	Zeit
Messzylinder	kleine Distanzen
Kompass	Winkel
Wasserwaage	senkrechte Ausrichtung
Federwaage	Volumen
Pyknometer	Geschwindigkeiten
Chronometer	Zeit, Sonnenstand
Sextant	horizontale Ausrichtung
Gnomon	Volumen
Lot	Volumen
Schlauchwaage	Richtung
Pipette	kleinste Strecken
Mikrometerschraube	horizontale Ausrichtung

Abb. 18.1 *Es reicht nicht, rohe Kraft wirken zu lassen. Man muss auch wissen, wohin.*

1.3 Vektoren und Skalare *(vectors and scalars)*

Vektor

Will man die Phänomene der Natur beschreiben und/oder verstehen, so fällt auf, dass es Größen gibt, bei denen die Angabe eines Zahlenwertes (Physiker/innen sprechen von einem **Betrag**) alleine nicht ausreichend ist. Man denke dabei an die Angabe einer Kraft. Physiker/innen ist dies zu wenig. Sie möchten zusätzlich wissen, in welche Richtung diese Kraft wirkt.

Die Kraft ist – wie man sagt – ein **Vektor**. Ob wir nach links oder rechts schauen, eine Schraube lösen oder festdrehen, es wird jedes Mal eine Richtung angegeben. Wir werden im Laufe unserer naturwissenschaftlichen Ausbildung noch weitere derartige Größen (Vektoren) kennen lernen.

Einen Vektor in einer Gleichung wird durch einen Pfeil oberhalb des Buchstabens gekennzeichnet: $\vec{F}$ [1)]

Vektoren lassen sich in ein Koordinatensystem oder Diagramm einzeichnen. Sie erscheinen dort als Pfeile. Dazu ist eine Angabe der Zeicheneinheit in die x- bzw. y-Richtung notwendig.

Der Einfachheit halber lässt man die Vektoren vom Koordinatenursprung ausgehen.

[1)] gesprochen: „F Pfeil" oder „Vektor F"

$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}$ ist die allgemeine Schreibweise eines Vektors **(Abb. 19.1)**.

Will man nur die **Länge eines Vektors** wissen bzw. mit ihm rechnen, so bestimmt man seinen **Betrag**. Mit Hilfe des pythagoräischen Lehrsatzes lässt er sich leicht berechnen **(Abb. 19.2)**.

Man schreibt:

$$|\vec{a}| = a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

Abb. 19.1 *Die Darstellung eines Vektors in einem Koordinatensystem*

Abb. 19.2 *Der Betrag eines Vektors*

Skalar

Es gibt natürlich auch Größen, bei denen die Angabe einer Richtung sinnlos ist. Die Masse, die Zeit oder die Temperatur sind solche. Derartige Größen nennt man **Skalare**. Ihre Abkürzungen sind die gewohnten Buchstaben ohne Pfeil.

Merk & Würdig

- Von einer **Vektorgleichung** spricht man, wenn in einer Gleichung eine vektorielle Größe auftritt. Als Beispiel soll eine der wichtigsten Gleichungen der Mechanik dienen:

  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

  $\vec{F}$ Richtung der Größe spielt eine Rolle

  F Richtung der Größe spielt **keine** Rolle

- Eine **Betragsgleichung** liegt dann vor, wenn entweder kein Vektor auftritt (z. B. ~ $= \frac{m}{V}$) oder von der vektoriellen Größe nur der Betrag von Interesse ist **(F = m ° a)**.
- Vektoren lassen sich sowohl rechnerisch als auch graphisch addieren.

Beispiel 1.4

Die beiden Vektoren $\vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $\vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ sollen rechnerisch und graphisch addiert werden **(Abb. 19.3)**.

$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4+2 \\ 1+3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{6} \\ \mathbf{4} \end{pmatrix}$$

Abb. 19.3 *zu Beispiel 1.4*

Beispiel 1.5

Welche Kraft $\vec{F}$ hält den beiden Kräften $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ das Gleichgewicht **(Abb. 20.1)**?

$\vec{F}_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} N; \vec{F}_2 = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} N$

$\vec{F}_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} N + \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} N = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} N$

$\vec{F} = -\vec{F}_3 \Rightarrow \vec{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{-2} \\ \mathbf{-3} \end{pmatrix} \mathbf{N}$

Abb. 20.1 *zu Beispiel 1.5*

1.4 Diagramme *(diagrams)*

Werden Messungen vorgenommen, so liegen die Daten in Form von Zahlenkolonnen vor. Man muss schon sehr geübt sein, um in diesen nicht die Übersicht zu verlieren. Eine grafische Darstellung hilft, diese Daten in eine übersichtliche und einprägsame Form zu bringen.

Aus der Mathematik kennt man bereits das Koordinatensystem, in den Naturwissenschaften wird es **Diagramm** genannt.

Arbeiten mit Diagrammen

Beispiel 1.6

Einer Federwaage wird der Reihe nach mit 1, 2, 3 … Schraubenmuttern belastet. Die Dehnung der Feder wird in Abhängigkeit der Anzahl der Muttern in einer Tabelle und einem Diagramm dargestellt.

Belastung Anzahl der Muttern	Dehnung Längenänderung in cm
1	1,0
2	2,5
3	4,0
4	5,0
5	6,5
6	8,0
7	9.0
8	10,5
9	11,5
10	13,0

Tabelle. 20.1

Abb. 20.2 *Die nebenstehende* ***Tabelle 20.1*** *und das obige Diagramm sind Beispiele aus einem Messprotokoll. Die Messpunkte liegen näherungsweise auf einer Geraden.*

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen durchführst, erwirbst du Fähigkeiten im Zeichnen und Interpretieren von Diagrammen.

Ü 1.12 Die **Tabelle 21.1** zeigt die Entwicklung der Weltrekorde im 100-m-Lauf der Damen. Zeichne die Daten in ein Diagramm.

Wähle eine sinnvolle Skaleneinteilung!

Was kannst du über die Messgenauigkeit aussagen?

Bemerkung: Seit 1988 hat sich der Weltrekord nicht geändert.

Jahr	Zeit (in s)[1)]
1934	11,7
1937	11,6
1948	11,5
1952	11,4
1955	11,3
1961	11,2
1965	11,1
1968	11,08
1976	11,01
1983	10,81
1988	10,49

Tabelle 21.1 *zu Ü 1.12*

Ü 1.13 *As baseball plays an important role in the USA, the physics of the throw was once studied in detail and the following graph was created.*

Abb. 21.1 *The variation with time of the velocities of the bat and the hands during the model swing.*

a) *Convert the Anglo-American measure mph into SI-units. (1 mph = 1,609 km/h)*

b) *How fast is **i)** the hand, **ii)** the bat 0,2 s after the start of the movement?*

c) *Can the hand reach a velocity of 74 km/h?*

Ü 1.14 In einem Kochtopf werden Erdäpfel gekocht. Die Temperatur ϑ wird in regelmäßigen Zeitabständen gemessen und das nebenstehenden Diagramm gezeichnet.

a) Welche Bedeutung hat der Knick in der Kurve?

b) Soll man nach 5 Minuten den Gashahn zurückdrehen oder auf voller Stufe brennen lassen? Jeweils begründen.

c) Was geschieht mit der zugeführten Energie in den ersten 5 Minuten und was nachher?

Abb. 21.2 *zu Ü 1.14*

Ü 1.15 Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit des Blutdrucks vom Lebensalter. Der Blutdruck[2)] eines Erwachsenen in guter körperlicher Verfassung beträgt 120 zu 80 mm Hg. Ein erhöhter Blutdruck (> 160 zu 95 mm Hg) erhöht die Gefahr eines Herzinfarkts.

Ab welchem Lebensalter ist mit einem erhöhten Blutdruck zu rechnen?

Abb. 21.3 *zu Ü 1.15*
Durchschnittliche Werte des menschlichen Blutdrucks

[1)] Ab 1968 erfolgte die Zeitmessung elektronisch.
[2)] Der Blutdruck wird in *mm Hg* gemessen. *mm Hg* … Millimeter Quecksilbersäule

Ortsachse

x

Ortskoordinaten werden auf der Ortsachse aufgetragen.

Zeitkoordinaten werden auf der Zeitachse aufgetragen.

Zeitachse

t

Abb. 22.1 *Achsen eines Weg-Zeitdiagramms*

1.5 Bezugssystem *(reference system)*

Jedes Ereignis ist dadurch gekennzeichnet, dass es an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt stattfindet.

Reale Bewegungen finden im Raum statt. Eine derartige Bewegung lässt sich nicht auf einem Blatt Papier darstellen. Deswegen beschränkt man sich auf eine Bewegung entlang einer Geraden. Der Physiker spricht von einer **geradlinigen Bewegung**. Damit ist die Bewegung durch zwei Koordinaten eindeutig festgelegt: die **Ortskoordinate x** und die **Zeitkoordinate t**.

Man kann daher diese Bewegung in einem Koordinatensystem einzeichnen.

Sicher bist du schon eine nach oben fahrende Rolltreppe hinunter gelaufen! Aber was passiert, wenn du hinunter läufst? Da kann es sein, dass du **relativ zu** den Stiegen daneben in Ruhe bist, obwohl du dich bewegst.

Wichtig ist zunächst nur der Schluss, den wir ziehen: Es gibt keine absolute Bewegung, sondern nur eine Bewegung relativ zu einem Bezugssystem. Die Relativitätstheorie beruht auf dieser Tatsache. Doch davon zu einem späteren Zeitpunkt.

Ergänzung & Ausblick

Eine besondere Art eines Bezugssystems stellt ein so genanntes **Inertialsystem** („inertia“, lat.: „Trägheit“) dar. Es handelt sich dabei um ein Bezugssystem, in dem das Trägheitsgesetz und die Newton´sche Mechanik (mit der sich dieses Buch beschäftigt) erfüllt sind, d. h. es dürfen keine Trägheitskräfte wirken. Systeme, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen (z. B. Autos, Radfahrer/innen etc.), sind derartige Inertialsysteme. Für unsere Zwecke können wir die Erde als Inertialsystem auffassen, obwohl sie rotiert und daher eine Kraft, die Zentrifugalkraft, wirkt.

Erklärungen sollen so einfach wie möglich und so kompliziert wie notwendig sein.

1.6 Idealisierung *(idealization)*

Naturvorgänge zu beschreiben ist oft nicht leicht. Man versucht daher, das Wesentliche zu erfassen und sich (zunächst) ein einfaches Modell davon zu machen.

Beispiele für

Idealisierungen

- Bewegungen werden als reibungsfrei angesehen.
- Die Gesetze des freien Falls gelten nur im stoffleeren Raum.
- Beim Newton´schen Gravitationsgesetz wird die Erde als homogene Kugel angesehen.
- Ein ausgedehnter Körper wird auf seinen Schwerpunkt reduziert.
- Wenn es nicht offensichtlich anders ist, werden alle Bewegungen als gleichförmig angenommen.
- Die Erde ist ein Inertialsystem.

Die Liste der Beispiele lässt sich beliebig verlängern.

Diese Idealisierung darf unter keinen Umständen zu einer unzulässigen Vereinfachung des gestellten Problems führen. Die Physik muss also die schwierige Situation meistern, mit einfachen Gesetzen eine komplexe Welt zu beschreiben.

ICH LIEBE DIE ABSTRAKTE KUNST!

DAS IST KEINE KUNST- DAS IST EIN HASSEPUNKT!

Abb. 22.2

Merk & Würdig

Die Gesetze sind, wie Naturwissenschaftler/innen sagen, einfach und symmetrisch und durch **Idealisierung** und **Abstraktion** gewonnen worden. **Symmetrie** bedeutet das unveränderte Aussehen eines Gesetzes, wenn man den Blickpunkt ändert.

Beispiele für

Symmetrie

- Der Ausgang von Experimenten ist unabhängig vom Ort und der Zeit.
- Die elektrischen Ladungen sind symmetrisch: positiv und negativ.
- Die Zeit hat keinen Einfluss auf die Naturgesetze und Naturkonstanten.

Merk & Würdig

Die Physik kann Vorhersagen machen.

1.7 Vom Rechnen *(about calculating)*

Die Naturwissenschaften bedienen sich der Sprache der **Mathematik**. Das Beherrschen einfacher Rechengesetze ist daher für die Naturwissenschaften unumgänglich, da die Phänomene durch Gleichungen wiedergegeben werden. Das Wesen der Gleichungen ist es nun, dass sie nicht nur erklären, wie etwas ist oder **war**, sondern auch, wie etwas sich verhalten **wird**. Als wäre es ein Blick in die Zukunft …

Alle Gleichungen und Formeln im Buch sind so gestaltet, dass die darin enthaltenen Größen immer in SI-Einheiten einzusetzen sind.

Anhand einfacher Beispiele wird gezeigt, wie man Aufgaben löst.

„Ich wünschte recht gelehrt zu werden,
Und möchte gern, was auf der Erden
Und in dem Himmel ist, erfassen,
Die Wissenschaft und die Natur …"
Aus: „Faust I" von
JOHANN WOLFGANG VON GOETHE
(1749 – 1832)

Abb. 23.1

Rechnen in den Naturwissenschaften

Beispiel 1.7

Die Gletscherzunge eines Gletschers bewegt sich in einem Jahr um 150 m weiter. Wie viele Zentimeter sind das am Tag?

Es ist sinnvoll, schrittweise vorzugehen.

1) Man schreibt zunächst die Angabe (in Kurzform) an und wandelt die gegebenen Einheiten in SI-Einheiten oder laut Fragestellung um:
$s = 150\text{ m} = 15\,000\text{ cm}$
$t = 1\text{ a} = 365\text{ d}$
Geschwindigkeit $v = ?$

2) Man sucht die geeignete/n Gleichung/en: $v = \frac{s}{t}$

3) Die Gleichung/en wird/werden eventuell umgeformt oder kombiniert.
(Das ist in diesem Fall nicht notwendig.)

4) Die umgewandelten Zahlenwerte der Angabe werden eingesetzt: $v = \frac{15\,000\text{ cm}}{365\text{ d}}$

5) Das Ergebnis wird berechnet (Einheiten nicht vergessen!): $v =$ **41 cm/d**

6) Antwortsatz formulieren (eventuell Ergebnis runden und interpretieren):
Die Gletscherzunge legt **etwa 41 cm pro Tag** zurück.

Beispiel 1.8

Wie lange ist ein Lichtjahr? (Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.)

1) $t = 1\ \text{a} = 365 \cdot 24 \cdot 3600\ \text{s}$

$v = 300\,000\ \text{km/s}$ (Das ist die Lichtgeschwindigkeit.)

Strecke $s = ?$

2) $v = \frac{s}{t}$

3) $s = v \cdot t$

4) $s = 300\,000\ \text{km/s} \cdot (365 \cdot 24 \cdot 3\,600)\ \text{s}$

5) $s = 9{,}4608 \cdot 10^{12}\ \text{km}$

6) Dieses Resultat täuscht eine Genauigkeit vor, die nicht vorhanden ist. Erstens ist die Angabe der Lichtgeschwindigkeit nur gerundet und zweitens ist die Länge eines Jahres ebenfalls nur ungefähr angenommen.

Daher: Ein Lichtjahr entspricht etwa der **Strecke s ≈ 10^{13} km.**

Beispiel 1.9

Wie groß ist die Masse einer Korkkugel von 1 m Durchmesser? Kann man sie heben?

Die Dichte von Kork beträgt $\rho = 250\ kg/m^3$

Notwendige Formeln: $\rho = \frac{Masse}{Volumen} = \frac{m}{V}$; $V = \frac{4 \cdot r^3 \cdot \pi}{3}$

1) $r = 0{,}5\ \text{m}$

$\rho = 250\ \text{kg/m}^3$

$m = ?$

2) $\rho = \frac{m}{V}$ und $V = \frac{4 \cdot r^3 \cdot \pi}{3}$

3) $m = \rho \cdot V \Rightarrow m = \frac{\rho \cdot 4 \cdot r^3 \cdot \pi}{3}$

4) $m = 250\ \text{kg/m}^3 \cdot 4 \cdot (0{,}5\ \text{m})^3 \pi/3$

5) $m =$ **130,899 kg**

6) **Die Masse beträgt 131 kg** und könnte (abgesehen von der unhandlichen Form) von einem trainierten Athleten gehoben werden.

Abb. 24.1

> „Ein Mensch sieht ein –
> und das ist wichtig:
> Nichts ist ganz falsch,
> und nichts ganz richtig."
> EUGEN ROTH (1895 – 1976)

> „Der Mangel an mathematischer Bildung gibt sich durch nichts so auffallend zu erkennen wie durch maßlose Schärfe im Zahlenrechnen."
> CARL FRIEDRICH GAUSS (1777 – 1855)

Beim Interpretieren der Resultate ist darauf zu achten, keine unsinnige Genauigkeit zuzulassen (wie die Beispiele 1.8 und 1.9 zeigen).

Abb. 24.2

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen durchführst, erwirbst du Fähigkeiten im

- Berechnen von einfachen Aufgaben,
- Umgang mit Einheiten,
- Arbeiten mit Zehnerpotenzen,
- Verstehen von Texten sowie im
- Aufstellen und Anschreiben von Gleichungen.

Ü 1.16 Der Radius der Erde beträgt etwa $6{,}37 \cdot 10^6$ m. Berechne den Umfang u, die Oberfläche A und das Volumen V in km, km² und km³.

Hinweis: $u = 2 \cdot r \cdot \pi$, $A = 4 \cdot r^2 \cdot \pi$, $V = \frac{4 \cdot r^3 \cdot \pi}{3}$

Ü 1.17 Drücke die Lichtgeschwindigkeit $c_o = 3 \cdot 10^8$ m/s in km/s, km/h und cm/ns aus!

Ü 1.18 In einem Jahrhundert nimmt die Tageslänge um ca. 0,001 s zu. Um wie viel länger wird der Tag in 20 Jahrhunderten sein? Wie lange dauert es, bis die Tageslänge um 1 s zugenommen hat?

Ü 1.19 In einem Tabellenbuch wird die Dichte von Eisen mit 7 860 kg/m³ angegeben. Rechne die Dichte in kg/dm³, dag/dm³ und g/cm³ um.

Ü 1.20 Die Erde besteht aus Atomen. Die durchschnittliche Masse eines Atoms beträgt etwa $7 \cdot 10^{-26}$ kg. Die Erde besitzt eine Masse von $6 \cdot 10^{24}$ kg. Aus wie vielen Atomen besteht die Erde?

Ü 1.21 Über Linz (Fläche $A \approx 9\,600$ ha) geht ein Platzregen nieder. Zeitungen berichten von 5 cm Wasser auf den Straßen. Wie viel Wasser (in m³) fiel etwa vom Himmel?

Ü 1.22 Ralf besitzt einen Globus von 40 cm Durchmesser. Er überlegt sich, wie hoch wohl der Mt. Everest auf dem Globus im gleichen Maßstab wäre.

$r_{Erde} = 6\,400$ km

Abb. 25.1 *zu Ü 1.21*

2 Einführung in ausgewählte Kapitel der Physik

In diesem Kapitel geht es um

- Elektrizität
- Magnetismus
- Schwingungen
- Wellen
- Schall
- Licht
- Wärme
- Temperatur

2.1 Einführung in die Elektrizitätslehre *(basics of electricity)*

2.1.1 Wir beobachten elektrische Phänomene

Wir sind umgeben von einer Unzahl elektrischer Vorgänge:

- Schließt man einen Stromkreis, indem man einen Schalter betätigt,
  - beginnt der Staubsauger zu arbeiten oder
  - das Licht beginnt zu leuchten oder
  - der Föhn erwärmt uns oder …
- Wenn wir dies lesen, arbeiten die Gehirnströme in unserem Gehirn auf höchsten Touren. (Das kann man durchaus mit einem Super-Computer vergleichen.)
- Die Tür des Kühlschranks schließt auf Grund starker Permanentmagnete, auch solche magnetische Effekte lassen sich „elektrisch" erklären.
- Phänomene der Elektrostatik beeindrucken:
  - das Knistern und Funken beim Ausziehen eines Kleidungsstücks oder
  - das Hochstehen der Haare bei dem Versuch mit dem Van de Graaff-Generator

Abb. 27.1

Experiment

Elektrodynamik

Abb. 27.2 ***Versuche mit dem Van-de-Graaff-Generator:*** *Die laufend gesammelte Ladung auf der Metallkugel steht für viele Experimente zur Verfügung.*

Abb. 27.3 ***Bernstein:*** *Die Bezeichnung „Elektrizität" stammt vom griechischen Ausdruck „elektron" für Bernstein. Bereits im Altertum waren elektrostatische Erscheinungen bekannt.*

Der griechische Philosoph Platon beschrieb, dass Bernstein, mit einem Katzenfell gerieben, Haare, Federn und ähnliche Stoffe anzieht.

Da elektrische und magnetische Erscheinungen denselben Ursprung haben, werden sie zum **Elektromagnetismus** zusammengefasst.

Ergänzung & Ausblick

Elektromagnetische Kräfte:
Betrachtet man die Kräfte, die uns im Alltag begegnen, wird uns die zentrale Rolle der elektromagnetischen Kräfte in der Naturwissenschaft bewusst. Außer der Gravitation haben alle Alltagskräfte einen einzigen Ursprung, den Elektromagnetismus.

Durch elektromagnetische Kräfte
- bilden sich Moleküle,
- ist Stahl hart und elastisch,
- ist Glas durchsichtig,
- wachsen Pflanzen aufwärts, obwohl die Gravitation nach unten zieht,
- ziehen sich Muskelfasern zusammen,
- übt Wasserdampf auf die Kochtopfwand Druck aus.

Lediglich bei sehr großen und bei sehr kleinen Abmessungen spielen andere Kräfte eine wesentliche Rolle:
- die Gravitation bzw. die
- starke und schwache Wechselwirkung (dies sind Kernkräfte).

Experiment

Reibungselektrizität

Abb. 28.1 *Durch Reiben eines Glas- oder eines Kunststoffstabes mit einem Seidentuch bzw. Fell können unterschiedliche Kraftwirkungen sichtbar gemacht werden:*

Abstoßung** und **Anziehung

- **Die Elektrische Ladung** (*electrical charge*):

Der Begriff **Ladung** wurde von BENJAMIN FRANKLIN[1] eingeführt. Franklin nannte die verschiedenen Ladungsarten **Plus (+)** und **Minus (–)**. Heute weiß man, dass der Glasstab beim Reiben **Elektronen** abgibt. Es entsteht in der Seide ein Elektronenüberschuss und im Stab ein Elektronenmangel. Nach Franklins Definition ist die Seide negativ geladen; die Ladung der Elektronen ist daher negativ.

Die **SI-Einheit der Ladung *Q*:**

$[Q] = C = As$

C … Coulomb, *As* … Amperesekunde

Den Betrag der Ladung **eines Elektrons** nennt man **Elementarladung** *e*: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,C$

- **Atommodell** (*model of the atom*):

Abb. 28.2 ***Atommodell** mit **negativ** geladener **Elektronenhülle** und sehr kleinem **Atomkern**. Der Atomkern besteht aus **positiv** geladenen **Protonen** und **ungeladenen Neutronen**.*

Experiment

Zum Selbermachen: Ein Wasserstrahl wird durch einen geladenen Kamm abgelenkt; dieser Effekt kann durch die Ladungsverteilung in Wassermoleküle erklärt werden:

Abb. 28.3

Abb. 28.4

Das Experiment zeigt:
Gleich geladene Gegenstände stoßen einander **ab** und **verschieden** geladene ziehen einander **an**.

Merk & Würdig

- Es gibt zwei Arten **elektrischer Ladung**: positive und negative Ladung.
- Gleich geladene Gegenstände stoßen einander ab, verschieden geladene ziehen einander an.
- Die **SI-Einheit** der **Ladung *Q*:**
  $[Q] = C = As$
  C … Coulomb
  As … Amperesekunde
- **Elementarladung *e*: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C**

[1] BENJAMIN FRANKLIN (1706 Boston – 1790 Philadelphia), US-amerikanischer Politiker, Schrift-steller und Naturforscher. Franklin arbeitete an der Unabhängigkeitserklärung und an der Verfassung der USA mit. Franklin gewann Weltruhm durch seine Forschungen in der Elektrizitätslehre (Erfinder des Blitzableiters).

Übungen

Ü 2.1 Überprüfe deine gelernten Fähigkeiten, indem du den Lückentext ausfüllst:

Der amerikanische Politiker Benjamin Franklin führte den Begriff Elektrizitätsmenge *Q* oder elektrische ____________ (*electric charge*) ein. Sein Labor war zumeist die Natur, und das Naturphänomen, das ihn am meisten beschäftigte, konnte ziemlich gefährlich werden: Ein ____________.

Er entdeckte, dass es zwei Ladungsarten geben muss und nannte sie ____________ und ____________ Ladung.

Heute wird die SI-Einheit der Elektrizitätsmenge *Q* nach dem französischen Physiker ____________ *(C)* genannt.

Im Atom findet man die kleinsten Ladungszahlen: Die Ladung eines Elektrons beträgt ____________ und man nennt sie ____________ladung. Ein Proton ist ____________ geladen und ein Elektron ____________ geladen.

Fast alle Kräfte der Natur lassen sich auf ____________ Kräfte zurückführen.

2.1.2 Der elektrische Stromkreis

Schließt man mit einem Kupferdraht eine Glühlampe an eine Batterie **(siehe Abb. 29.1)**, dann spricht man von einem einfachen **Stromkreis**.

Die Lampe leuchtet nur, wenn der Stromkreis geschlossen ist. Daraus schließt man, dass „etwas" im Kreis fließt. Es zeigt sich, dass das, was sich bewegt, die im Kapitel zuvor erwähnte **elektrische Ladung *Q*** ist!

- **Die elektrische Stromstärke *(intensity of electric current)*:** Die im Stromkreis pro Zeit transportierte Ladung heißt **elektrische Stromstärke *I*** (kurz „elektrischer Strom *I*"):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Δ ist ein griechischer Buchstabe und bedeutet in dieser Formel „Ladungsdifferenz"; sprich: „Delta Q". Man darf in solchen Formeln *Δ* nicht kürzen!

Die elektrische Stromstärke *I* ist im internationalen Maßsystem als **SI-Grundgröße** definiert.

Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist als Basiseinheit mit 1 **Ampere**[1] ***(A)*** festgelegt. Damit kann die Einheit der Ladung Coulomb *(C)* auch als „**Amperesekunde**" *(As)* bezeichnet werden.

- **Stromrichtung**: Die negativ geladenen Elektronen bewegen sich vom Minuspol zum Pluspol; dies nennt man die **physikalische Stromrichtung**.
- Die **technische Stromrichtung** ist in Richtung der Bewegung von positiven Ladungsträgern definiert, sie verläuft also vom positiven zum negativen Pol. Die technische Stromrichtung wird in elektrischen Stromkreisen verwendet.
- Die Stromstärke *I* misst man in Ampere mit einem Messgerät, das man **Amperemeter** nennt.
- Im einfachsten Fall fließen in jeder Sekunde gleich viele Ladungen durch den Leiter. Man spricht dann von konstantem **Gleichstrom**[2] (*direct current*, Abkürzung: *DC*).

Experiment

Stromkreis

Abb. 29.1 *Einfacher Stromkreis*

freie Elektronen
Querschnitt A
technische Stromrichtung
Ladung *ΔQ*

Abb. 29.2 ***Stromstärke I:*** *In der Zeit Δt fließt die Ladung ΔQ durch den Leiter.*

Die Stromrichtung ist entgegen der Bewegung der negativen Ladungsträger definiert.

[1] ANDRÉ MARIE AMPÉRE (1775 – 1836), französischer Mathematiker und Physiker, entdeckte die magnetischen Wirkungen in der Umgebung stromdurchflossener Leiter, erklärte den Magnetismus durch Molekularströme. Er genoss keine Schulbildung, sondern war auf jedem Wissensgebiet Autodidakt, wie es viele Vertreter der Aufklärung forderten.

[2] Ein veränderlicher Strom wird als Wechselstrom bezeichnet (*alternating current*), Abkürzung: *AC*.

Abb. 29.3 *AMPÉRE*

A Strom

I

Ladung Q

Zeit

t s

Abb. 30.1 *Die Stromstärke I verändert sich im Verlauf der Zeit* ***nicht****. Der Flächeninhalt des rot gefüllten Rechtecks kann als* ***Ladung Q*** *interpretiert werden und einfach über* $Q = I \cdot t$ *berechnet werden.*

A Strom

I

ΔQ

Zeit

Δt s

Abb. 30.2 ***Die Stromstärke I verändert sich im Lauf der Zeit.*** *Der Flächeninhalt des schmalen rot gefüllten Rechtecks kann als* ***Ladung ΔQ*** *interpretiert werden und über* $\Delta Q = I \cdot \Delta t$ *berechnet werden.*

Merk & Würdig

- **Elektrische Stromstärke** I: $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- **Basis-Einheit:** $[I] = A$ **(Ampere)**
- **„Amperesekunde"**
  Einheit der Ladungsmenge: $[Q] = [I] \cdot [t] = As = C$
  ΔQ … Ladungsmenge, die pro Zeiteinheit durch den Leiter fließt
  Δt … dazu benötigte Zeit; $[t] = s$

Beispiel 2.1

Ladungsmenge einer Autobatterie

Michael hat vergessen, die Innenraumbeleuchtung seines Kfzs abzuschalten. Die voll geladene Autobatterie hat eine Ladungsmenge laut Typenschild von 35 Ah.

Wie lange wird die Autobatterie Strom für die Innenraumbeleuchtung liefern, wenn bis zu deren vollständiger Entladung eine konstante Stromstärke von 1,5 A fließt?

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta Q}{I} = \frac{35\,Ah}{1{,}5\,A} = 23{,}3\,h$$

Nach **nicht ganz 24 Stunden** ist die Batterie leer.

Anmerkung: Im Beispiel 2.1 wird vorausgesetzt, dass die Stromstärke im Verlauf der Zeit bis zur vollkommenen Entladung konstant bleibt, dann lässt sich die Formel der Stromstärke so einfach umstellen wie im vorgerechnetem Beispiel. Das zugehörige Diagramm ist in **Abb. 30.1** abgebildet.

In der Praxis wird jedoch die Stromstärke, die von der Batterie geliefert wird, gegen Ende des Entladungsvorganges abnehmen, wie **Abb. 30.2** zeigt.

Übungen

Wenn du die folgende Übung schaffst, dann kannst du Vorgänge, wie sie beim Aufladen eines Akkumulators ablaufen, fachgerecht beschreiben.

Ü 2.2 Zeichne ein **Diagramm**, das darstellt, wie sich die Stromstärke im Verlauf der Zeit ändert, wenn eine aufladbare Batterie 1,5 h mit 12 A, und etwas später 2 h lang mit 8 A jeweils konstantem Strom geladen wird. Dazwischen fließt für 1,5 h kein Ladestrom.

In dieser Übung zeigst du, dass du die wesentlichen physikalischen Größen in einem Diagramm erkennen und ein Ergebnis abschätzen kannst.

Ü 2.3 In dem nebenstehenden Diagramm **(Abb. 30.3)** wird ein Stromsparvorgang dargestellt, wie er beim Betrieb eines Laptops vorkommt. Um Energie zu sparen, wird die Leistung der Festplatte reduziert. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass die Festplatte gerade „keine Arbeit" hat. Schätze aus dem Diagramm ab, welche Ladung der Batterie für die betrachteten 50 Minuten entnommen wurde.

mA Stromstärke

600, 500, 400, 300, 200, 100

Zeit

0 10 20 30 40 50 min

Abb. 30.3 *zu Ü 2.3*

Wenn du die folgenden Übungen löst, dann kannst du Probleme analysieren und berechnen.

Ü 2.4 **Ladungsmenge:** Berechne mit den Angaben von **Ü 2.2** die gesamte vom Akku aufgenommene Ladungsmenge. (Ergebnis in zwei Einheiten angeben: *Ah* und *As*)

Ü 2.5 Der **Startermotor** eines 4-Taktmotors zieht beim Startvorgang ca. 300 A Strom aus der Autobatterie. Wie lang kann mit einer voll geladenen 12 V Autobatterie und 45 Ah Ladekapazität der Startvorgang ausgeführt werden?

Ü 2.6 Ein **Gewitterblitz** transportiert in der Zeitspanne von 10^{-4} s eine Ladungsmenge von 5 C. Wie groß ist die Stromstärke?

Ü 2.7 *How much* ***charge*** *flows in the following example? 5 μA for 20 s*

BLITZ
STROMVERSORGUNGS-
GES. M.B.H

Abb. 30.4 *zu Ü 2.6*
Warum geht die Firma pleite?

Beispiel 2.2

How many electrons are working?

The charge carried by one electron is 1,6 · 10⁻¹⁹ As. If the current in a wire is 1 A, calculate the number of electrons that pass any point each second.

$\Delta Q = I \cdot \Delta t = 1\text{A} \cdot 1\text{s} = 1\text{C}$

The number n of electrons which summery 1 C is:

$$n = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{1\ \text{As}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As}} = \mathbf{0{,}625 \cdot 10^{19}}$$

This calculation shows, that there are very many electrons in a working-process!

Die **Ladung** eines einzelnen Elektrons ist sehr klein ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As). Bei Stromstärken von Verbrauchern im Haushalt sind sehr viele Elektronen beteiligt! ($\approx 10^{19}$, wie Beispiel 2.2 zeigt.)

Merk & Würdig

- **Die Stromstärke bei einer Serienschaltung:**
  Die einfache Schaltung von mehreren Verbrauchern nennt man Serien- oder Reihenschaltung. Derselbe Strom I fließt durch alle Verbraucher.

Abb. 31.1 ***Serienschaltung von drei Glühlampen:*** *Das Amperemeter A wird ebenfalls in Serie geschaltet und zeigt den Strom I an.*

- **Die Stromstärke bei einer Parallelschaltung:**
  Werden Verbraucher parallel geschaltet, dann teilt sich die Ladung, die von der Batterie kommt, auf die drei Strompfade auf. Der Gesamtstrom ist gleich der Summe der Teilströme[1] : $I = I_1 + I_2 + I_3$

Abb. 31.2 ***Parallelschaltung von drei Glühlampen.*** *Die Ströme durch die drei Verbraucher addieren sich zum Gesamtstrom I.*

- **Die elektrische Spannung** (*electrical voltage*):
  Auf Batterien kann man Kenngrößen ablesen, beispielsweise 1,5 V. Diese Größe wird elektrische Spannung *U* genannt. Die Spannung wird mit einem Voltmeter gemessen, als Einheit dient das Volt[2] *(V)*.
  Spannung U; [U] = 1 V (Volt)

Abb. 31.3 ***Multimeter:*** *Dieses Vielfachmessinstrument ermöglicht das Messen verschiedener elektrischer Größen. Durch Umschalten kann es unter anderem als Amperemeter und Voltmeter verwendet werden.* ***Rechts:*** *Schaltzeichen für Amperemeter, Voltmeter und Gleichspannungsquelle.*

Abb. 31.4 *VOLTA*

[1] Diese Regel kann man verallgemeinern: Sie wird als Knotenregel bzw. als erstes Kirchhoff´sches Gesetz bezeichnet.
[2] ALESSANDRO VOLTA (1745 – 1827) italienischer Physiker, Professor der Naturphilosophie in Padua; nach ihm wurde die Einheit der Spannung benannt. Er entdeckte die Elektrolyse von Wasser und das Voltaelement.

Spannung etwa 2 V
Platte aus Bleidioxid (PbO_2)
Platte aus Blei (Pb)
Elektrolyt aus Wasser (H_2O) und Schwefelsäure (H_2SO_4)

Abb. 32.1 *Im* ***Bleiakkumulator*** *wandern beim Entladen positive H^+-Ionen aus der Lösung an die Bleioxidplatte (PbO_2) und negative Ionen zur Bleiplatte (Pb).*

Die Elektronen stoßen mit ...
... Gitterbausteinen des Metalls zusammen
... und geben einen Teil ihrer Energie ab ⇒ Erwärmung des Metalls

Abb. 32.3 *Die* ***Elektronen*** *bewegen sich im Leiter. Durch Zusammenstöße der Elektronen mit den Gitterbausteinen des Metalls wird elektrische Energie in Bewegungsenergie des Kristallgitters und damit in* ***Wärme*** *umgewandelt.*

Abb. 32.4 *OHM*

Spannungsquellen: Durch Spannungsquellen wird die Energie bereitgestellt, die zum Verschieben der Ladungen notwendig ist.

Beispiele für Spannungsquellen:

- **Chemische Spannungsquellen**, wie Bleiakkumulator, Zink-Kohle-Batterie, Knopfzellen (Silberoxid-Zink), usw.
- In **Solarzellen** wird Licht in elektrische Energie umgewandelt (Photovoltaik).
- Im **Generator** wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.
- **Bandgenerator:** Der Physiker VAN DE GRAAFF hat 1931 einen Bandgenerator entwickelt. Dieser ermöglicht es, mittels Reibung laufend Ladungen und damit hohe Spannungen zu erzeugen.

Vergleich Stromkreis und Wasserkreislauf:

Stromkreis	Wasserkreislauf
In diesem (einfachen) Stromkreis verrichtet die Batterie Arbeit an den fließenden Elektronen. $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ Abb. 32.2	Eine Batterie kann mit einer Pumpe in einem Wasserkreislauf verglichen werden.
Die Spannungsquelle (Batterie) verrichtet Arbeit und pumpt Elektronen in das Leitungsnetz. Durch das permanente Anliegen einer Spannung fließt elektrischer Strom durch einen Verbraucher.	Die Pumpe verrichtet Arbeit an den Wassertröpfchen. Sie baut einen Druck auf, so dass fortlaufend Wasser fließen kann. Der Druck ist nötig um den Strömungswiderstand zu überwinden.
Spannungsquelle	Pumpe
Spannung	Druck
Strom	Durchflussmenge pro Zeit
Elektrischer Widerstand	Strömungswiderstand

- **Der elektrische Widerstand** (*electric resistance*)

Aus dem Vergleich eines Stromkreises mit einem Wasserkreislauf erkennt man:

Der Wasserdurchfluss in Leitungen (rechts) wird gebremst. Dies wird als Strömungswiderstand bezeichnet. Analog gilt im Stromkreis: Die Glühlampe als Verbraucher bremst den Elektronenfluss, sie bildet einen **elektrischen Widerstand *R***.

Der elektrische Widerstand kann als jene Eigenschaft verstanden werden, die die **Bewegung der Ladungen hemmt**. Der elektrischer Widerstand begrenzt damit die **Stromstärke *I***!

Der elektrischer Widerstand R wird in der Einheit Ohm[1] (Ω, großer griechischer Buchstabe Omega) angegeben.

Widerstand *R; [R]* = *Ω* (Ohm)

[1] GEORG SIMON OHM (1789 Erlangen – 1854 München) deutscher Physiker, Lehrer am Gymnasium in Köln und an der Kriegsschule in Berlin, ab 1833 Leiter der Polytechnischen Schule in Nürnberg, ab 1849 Professor für Mathematik und Physik an der Universität in München; entdeckte 1826 das nach ihm benannte Gesetz; arbeitete auch an einer Theorie der Obertöne sowie in der Optik. Ohm lebte in ärmlichen Verhältnissen und seine wissenschaftliche Leistung wurde in Deutschland viele Jahre ignoriert.

- **Elektrische Leitfähigkeit** (*electric conductivity*): In **Abb. 32.3** ist das Elektronen-Modell der Stromleitung symbolisch abgebildet:

Leitet ein Material, beispielsweise **Metall**, den Strom sehr gut, dann stehen viele frei bewegliche Leitungselektronen für die Stromleitung zur Verfügung.

Leitet ein Material den Strom sehr schlecht (**Isolator**), dann liegt das daran, dass kaum Elektronen frei beweglich sind und zur Stromleitung zur Verfügung stehen. Isolatoren haben einen großen Widerstand.

In Leitern stoßen laufend Elektronen mit den Gitterbausteinen zusammen. Bei diesen Zusammenstößen geben die Elektronen einen Teil ihrer Energie an das Metall ab.

Es wird also elektrische Energie in **Wärme** umgewandelt.

Ergänzung & Ausblick

Einteilung von Widerstandsmaterialien:

- Materialien mit hoher Leitfähigkeit werden als gute **Leiter** bezeichnet (z. B.: Metalle)
- Materialien mit niedriger Leitfähigkeit bezeichnet man als **Isolatoren**: z. B.: Kunststoff, Keramik
- Bestimmte Materialien können, z. B. abhängig von der angelegten Spannung, leiten oder isolieren; diese bezeichnet man als **Halbleiter** (z. B.: Silizium, Germanium).

Abb. 33.1 *Schaltzeichen für Widerstände*

Typische Werte für elektrische Größen:

Beispiel	Wert
Spannungen:	
Nervenzellen (Ruhepotenzial)	bis 100 mV
Monozelle (Zink-Kohle-Batterie)	1,5 V
Gedruckte Schaltungen (z. B. Laptop)	3 V – 5 V
Haushalt („Lichtstrom“); AC[1]	230 V
Haushalt („Kraftstrom“); AC	400 V
Freileitungen; AC	30 kV – 800 kV
Gewitter	bis 100 MV
Ströme:	
LED-Ziffernsegmentanzeige 10 mm	20 mA
100 W Glühbirne (AC)	~ 0,4 A
Waschmaschine (AC)	~ 9 A
Hochspannungsleitung pro Leiter (AC)	bis 1500 A
Gewitter	bis 10^6 A

Tabelle 33.1

Abb. 33.2 *Ein **Spannungsmessgerät** wird immer parallel zum Verbraucher R oder zur Spannungsquelle U angeschlossen.*

Ergänzung & Ausblick

Leitwert: Der Kehrwert des Widerstands wird elektrischer Leitwert *G* genannt.

$$\frac{1}{R} = G$$

Die Einheit des Leitwerts:

$[G] = 1/[R] = \Omega^{-1} = S$ (Siemens)

[1] Für AC, also Wechselstrom- bzw. Wechselspannungswerte, werden Effektivwerte angegeben.

Übungen

Ü 2.8 Teste dich selbst! Wenn du 10 Punkte erreichst, dann weißt du über wichtige physikalische Größen und Einheiten und über das Elektronen-Modell der elektrischen Leitfähigkeit gut Bescheid!

a) Wie bezeichnet man die elektrische Spannung (Formelzeichen)?

☐ *I* ☐ *N*
☐ *U* ☐ *O*

b) Wie bezeichnet man den elektrischen Widerstand (Formelzeichen)?

☐ *U* ☐ *N*
☐ *G* ☐ *R*

c) Was sind Einheiten für die elektrische Spannung?

☐ *mA; kA;* ☐ *kV; mV*
☐ *V* ☐ *MΩ; mΩ*

d) Wie wird die Spannung gemessen?

☐ in Serie zu den Verbrauchern im Stromkreis
☐ parallel zum Widerstand
☐ durch „probieren"

e) Mit welchem Messgerät misst man die Stromstärke?

☐ mit einem Multimeter
☐ mit einem Amperemeter
☐ mit einem Voltmeter

f) Ein elektrischer Widerstand ist vergleichbar mit

☐ dem Strömungswiderstand
☐ einer Pumpe
☐ einem unsympathischen Menschen
☐ dem Druck

g) In einem Strom durchflossenen Widerstand

☐ stoßen Elektronen an Neutronen
☐ entsteht Wärme
☐ stoßen Protonen an das Kristallgitter
☐ geben Elektronen an das Atomgitter Energie ab

h) Ein guter Leiter

☐ hat einen hohen Widerstand
☐ ist ein Isolator
☐ ist aus Metall
☐ hat einen Widerstand im $\mu\Omega$-Bereich

Mehrfachantworten möglich.

Abb. 34.1

2.1.3 Das Ohm´sche Gesetz

SIMON OHM fand einen Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung und dem elektrischen Widerstand. Mit Hilfe des nachstehenden Experiments können Ohms Überlegungen nachvollzogen werden:

Experiment

Widerstand eines Metalldrahtes

Man verbindet Netzgerät, Spannungs- und Strommessgerät wie in der abgebildeten Schaltung mit einem Metalldraht (Widerstandsdraht).

Die Messergebnisse der Strom- und Spannungsmessung trägt man in einer Tabelle ein und stellt sie in einem U-I-Diagramm dar.

Dies wiederholt man mit einem anderen Draht.

Abb. 34.2 ***Messaufbau*** *(links),* ***Schaltplan*** *(Mitte) und* ***U-I-Diagramm (Widerstandskennlinien)*** *zweier Metalldrähte.*

Im Experiment **(Abb. 34.2)** erkennt man, dass

- die Stromstärke I zur angelegten Spannung U direkt proportional ist $(I \sim U)$; die Kennlinie verläuft linear.
- der Anstieg der Kennlinie von der Art des gewählten Drahts abhängt. Sie ist von dessen elektrischem **Widerstand** R abhängig. Die **Widerstandskennlinie** eines kleineren Widerstands steigt stärker an, als die eines größeren Widerstandes.
- bei gleicher Spannung U durch einen größeren elektrischen Widerstand weniger Strom fließt als durch einen niedrigeren Widerstand.

Dies wird im **Ohm´schen Gesetz** zum Ausdruck gebracht:

$$\boldsymbol{I = \frac{U}{R}}$$

Einheit des Widerstands: [R] = V/A = Ω (Ohm)

U … Spannung, $[U] = V$ I … Stromstärke, $[I] = A$

- **Temperaturabhängigkeit:** Der elektrische Widerstand ist im Allgemeinen **temperaturabhängig**.

Abb. 35.1 *Eine Glühwendel kann als* ***Ohm´scher Widerstand*** *betrachtet werden. Elektrische Energie wird in Wärme- und Lichtenergie umgewandelt.*

(Mit Veränderung der Temperatur verändert sich allerdings auch der Widerstand!)

Beispiel 2.3

Widerstandskennlinie: Im Diagramm **Abb. 34.2** ist jeweils der Widerstand der Metalldrähte zu bestimmen.

Man liest die Spannungs- und Stromwerte ab und erhält beispielsweise für die

a) steilere Kennlinie: Bei 2 V liest man eine Stromstärke von 0,6 A ab.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2\,\text{V}}{0{,}6\,\text{A}} = \mathbf{3{,}33\,\Omega}$$

b) flachere Kennlinie: Bei 10 V liest man eine Stromstärke von 0,2 A ab.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10\,\text{V}}{0{,}2\,\text{A}} = \mathbf{50\,\Omega}$$

Beispiel 2.4

Taschenlampe: Ein Strom mit der Stärke 1,5 A fließt über eine Glühwendel. Welchen Widerstand und welchen Leitwert hat die Glühlampe, wenn die anliegende Batteriespannung 4,5 V beträgt?

Der Widerstand beträgt

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4{,}5\,\text{V}}{1{,}5\,\text{A}} = \mathbf{3\,\Omega}$$

woraus sich ein Leitwert ergibt von

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{3\,\Omega} = \mathbf{0{,}33\,S}$$

Beispiel 2.5

Schrittspannung: Eine der häufigsten Todesursachen von Kühen auf den (österreichischen) Almen ist der Blitzschlag. Das Großvieh kann getötet werden, auch wenn es relativ weit vom Einschlagspunkt entfernt weidet. Die nebenstehende Zeichnung **(Abb. 35.2)** zeigt die Spannungsverhältnisse um den Einschlagpunkt.

„Schrittspannungen" können tödlich wirken, wenn der Körperwiderstand und der Übergangswiderstand zum Körper, beispielsweise durch Nässe, gering ist, und ein Strom über den Körper von mehr als 30 mA fließt.

Annahme: Die Schrittspannung sei 600 V und der Körperwiderstand inkl. Übergangswiderstand sei 2 kΩ.

Welcher Strom fließt über den Tierkörper?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{600\,\text{V}}{2000\,\Omega} = \mathbf{0{,}3\,A}$$

Die Stromstärke von 300 mA überschreitet den tödlichen Grenzwert von 30 mA bei weitem.

Abb. 35.2 *Schrittspannung*

Merk & Würdig

Ohm´sches Gesetz:

$$I = \frac{U}{R} \qquad R = \frac{U}{I} \qquad U = I \cdot R$$

U … Spannung, *[U] = V*

I … Stromstärke, *[I] = A*

R … Ohmscher Widerstand, *[R] = Ω* (Ohm)

Übungen

Wenn du die folgenden Beispiele löst, dann kannst du naturwissenschaftliche Fragestellungen analysieren, Lösungsansätze formulieren und berechnen.

Ü 2.9 Welche Spannung liegt an einem **Metallfilmwiderstand** mit 470 Ω an, wenn eine Stromstärke von 5,8 mA gemessen wird?

Ü 2.10 **Potenziometer:** Auf welchen Wert muss ein verstellbarer Widerstand in einer Schaltung gestellt werden, wenn bei einer Spannung von 9 V ein Strom von 30 mA fließen soll? Gesucht ist auch dessen Leitwert.

Ü 2.11 **Überlastung:** Ein Widerstand mit 10 kΩ verträgt maximal einen Strom von 2 mA. Welche Spannung kann an den Widerstand angelegt werden, ohne ihn zu überlasten?

Ü 2.12 **Warum fällt der Vogel nicht tot von der 380 kV Starkstromleitung?** Eine Schrittspannung von 30 V könnte für eine Krähe tödlich sein. Der Aluminiumdraht mit Stahlkern hat eine hohe Leitfähigkeit und daher einen sehr geringen Widerstand: Bei einer Schrittweite von 12 cm ergibt sich ein Widerstand von 5 μΩ. Berechne die Schrittspannung zwischen den Krähenfüßen bei einer Stromstärke von 1 100 A.

Abb. 36.1 *zu Ü 2.12*

In dieser Übung zeigst du, dass du physikalische Experimente planen kannst, und dass du physikalische Größen in einem Diagramm erkennen und Ergebnisse abschätzen kannst.

Ü 2.13 **Widerstandskennlinie:** Wie könnte man die Diagramme aus **Abb. 36.2** messtechnisch erhalten?

a) Skizziere eine Schaltung, mit der man an einem Widerstand Strom und Spannung messen kann. Beachte, dass der Stromkreis geschlossen ist. Erkläre in einfachen Worten, was du messen willst.

b) Bestimme jeweils den zugehörigen Widerstand der Kennlinien.

Abb. 36.2 ***Widerstandskennlinie*** *zu Ü 2.13*

2.1.4 Gefahren des elektrischen Stroms

Wir Menschen verfügen über kein eigenes Sinnesorgan, mit dem wir elektrischen Strom wahrnehmen können. Ist es so weit, dass wir elektrischen Strom bereits „riechen" oder „fühlen" können, dann ist es möglicherweise schon zu spät …

Warum ist der elektrische Strom für den Menschen gefährlich?

Der Körper steuert seine Funktionen durch schwache elektrische Ströme, die über die Nerven weitergeleitet werden. Wenn nun ein Strom von außen den Körperströmen überlagert wird, kommt es zu Fehlfunktionen, z. B. zur Verkrampfung der Muskeln oder zum lebensgefährlichen Herzkammerflimmern. Schon bei einem Stromdurchfluss durch den Körper von nur 30 mA kann ein Stromunfall zum Tode führen.

Die Verkrampfung der Handmuskulatur führt oft dazu, dass man den Strom führenden Gegenstand nicht mehr loslassen kann. Auch kommt es häufig zu Reflexen und unkontrollierten Bewegungen des Verunglückten. Diese können dann einen **Sekundärunfall**, wie den Sturz von einer Leiter nach sich ziehen.

Abb. 36.3 *Der Mindestabstand zu Freileitungen wird leicht unterschätzt!*

Besondere Gefahr besteht im Bereich von Hochspannungsleitungen!

Hier kann es bereits ohne Berührung zu einem Funkenüberschlag von der Freileitung zu der Person kommen. **(Siehe Abb. 37.1)**

Auch wenn Elektrogeräte schutzisoliert sind, ist ein sorgsamer Umgang wichtig:

- Beschädigte elektrische Kabel dürfen nicht mehr verwendet werden.
- Im Freien ist die Gefahr besonders groß! Wenn man eine beschädigte Stelle des Kabels berührt, kann der Strom über die Hand durch den Körper in den Boden fließen. Das bedeutet akute Lebensgefahr!
- Mit Isolierband zu flicken ist unzulässig!

Abb. 37.6 *Strom wird gefährlich, sobald er durch den Körper oder durch Teile des Körpers fließt. Über eine* ***Erdleitung*** *kann bei einem Defekt Strom abgeleitet werden. In der Folge unterbricht die* ***Sicherung*** *den Stromkreis.*

Merk & Würdig

Schutzmaßnahmen

Falls ein Mensch an einer Stromleitung hängt und nicht mehr davon loskommt, sollte man folgende Maßnahmen beachten:

- Stromkreis unterbrechen (Sicherungsschalter oder NOTAUS drücken). Falls dies nicht möglich ist, sollte der Mensch so vom Gefahrenbereich weggezogen werden, dass man selbst keinen Stromschlag bekommt (z. B. geschützt durch Kunststoffhandschuhe).
- Danach, wenn nötig, Erste Hilfe anwenden.
- Sofort den Notarzt rufen (**Tel.: 144**).
- Auch wenn der Betroffene nach einem solchen Stromschlag keine Schmerzen hat, trotzdem in ein Krankenhaus fahren, denn es können innere Verletzungen entstanden sein.

Abb. 37.4 *Erst den Stecker ziehen, dann das Gerät reinigen!*

Abb. 37.5 *Auf keinen Fall sollten elektrische Geräte in der Badewanne benutzt werden!*

Abb. 37.1 *Große Gefahr besteht im Bereich der elektrischen Anlagen im Bahngelände.*

Abb. 37.2 *Nie die Reißfestigkeit eines Kabels testen!*

Abb. 37.3 *„Basteln" an elektrischen Geräten … Niemals, solange sie unter Spannung stehen!*

2.2 Grundlegendes vom Schall und vom Licht

(basics of sound and light)

Abb. 38.1 *Die **Zeitmessung** beruht auf periodischen Bewegungen.*

2.2.1 Schwingungen *(oscillation)*

Schwingungen sind ständig wiederkehrende (periodische) Vorgänge. Wir beobachten sie sehr häufig in der Natur und unserer Alltagswelt:

- das Schwanken eines Baumes im Wind
- die rhythmische Bewegung beim Tanzen
- das Wechseln der Helligkeit im Tag-Nacht-Rhythmus
- das Ansteigen und Absinken der Temperatur im Tag-Nacht-Rhythmus
- die Schallschwingung
- die Schwingungen des Wechselstroms
- die Frequenzen verschiedener Radiosender

Abb. 38.2 *Das Schwingen eines Spinnennetzes ist ein faszinierendes Beispiel für Federschwingungen in der freien Natur.*

2.2.2 Das Federpendel *(simple pendulum)*

Wir betrachten einen Körper, der an einer Schraubenfeder aufgehängt ist. Wir versetzen den Körper in Schwingungen, indem wir ihn aus der Gleichgewichtslage nach unten ziehen und auslassen.
Zu einer beliebigen Zeit *t* beträgt der Abstand zur Ruhelage y(t).
y(t) wird **Auslenkung** (*displacement*) genannt[1].

- **Amplitude** (*amplitude*) heißt die maximale Auslenkung (in **Abb. 38.3** mit y_0 bezeichnet).

Merk & Würdig

- **Schwingungen** sind **periodische**, also sich zeitlich wiederholende **Vorgänge**.
- Schwingungsfähige Systeme nennt man **Oszillatoren**: z. B.: Pendel, Stimmgabel, elektrische Schwingkreise …

Abb. 38.3 *Eine Masse führt eine Federschwingung aus. Der Abstand zur Ruhelage y(t) verändert sich periodisch im Verlauf der Zeit.*

Abb. 38.4 *Weg-Zeit-Diagramm eines Federpendels: Reibung und Luftwiderstand dämpfen die Amplitude im Verlauf der Zeit.*

[1] y(t) wird „y von t" ausgesprochen und wird auch „**Elongation**" genannt.

- **Periodendauer** (*period*): In **Abb. 39.1** kann man auf der Zeitachse die Zeit ablesen, die für eine vollständige Schwingung benötigt wird. Sie heißt Periodendauer oder **Schwingungsdauer T**.
- **Frequenz** (*frequency*): Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer, mit der das Pendel schwingt. Die Frequenz f gibt die Zahl der Schwingungen pro Sekunde an:

  $f = \frac{1}{T}$ $[f] = 1/s = s^{-1} = Hz$

  T … Periodendauer $[T] = s$

  Die Frequenz f misst man in $1/s = Hz$.

  Hz ist die Abkürzung von Hertz[1].

  1 Hz entspricht einer vollständigen Schwingung in einer Sekunde.
- **Winkelgeschwindigkeit ω** (*angular speed*): In **Abb. 39.2** erkennt man, dass die Auf- und Abbewegung des Pendels im Lauf der Zeit eine Sinuskurve beschreibt. Eine Sinusfunktion lässt sich aber auch durch die Projektion einer Drehbewegung erzeugen. Die konstante **Winkelgeschwindigkeit ω** oder **Kreisfrequenz** der Drehbewegung steht dabei mit der Frequenz des Pendels in Zusammenhang:
  $\omega = 2\pi \cdot f$

  ω … Winkelgeschwindigkeit oder Kreisfrequenz (griechischer Buchstabe „klein Omega“) $[\omega] = 1/s$

  f … Frequenz $[f] = Hz = 1/s$

  ω wird als überstrichener Winkel pro dafür benötigte Zeit definiert:

  $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

  Man kann vereinfacht auch schreiben: $\varphi = \omega \cdot t$ $[\varphi] = 1 = rad$

Abb. 39.1 *Die Zeit, die die Pendelmasse für eine vollständige Schwingung braucht, heißt **Periodendauer T**.*

Abb. 39.2 *Die Bewegung des Federpendels wird als Projektion eines rotierenden Punktes betrachtet. Die periodische Auf- und Abbewegung kann im Verlauf der Zeit gezeichnet werden. Es entsteht dabei eine Sinuskurve.*

Merk & Würdig

$f = \frac{1}{T}$

$\omega = 2\pi \cdot f$

ω … Kreisfrequenz $[\omega] = 1/s$

f … Eigenfrequenz $[f] = Hz$

T … Periodendauer $[T] = s$

Experiment

Federpendel

Abb. 39.3 *Belastet man eine Feder zuerst mit einer großen Masse und danach mit einer kleinen Masse, kann man Folgendes beobachten: Sie schwingt verschieden schnell. Die Periodendauer T der großen Masse ist größer, die Frequenz geringer! Dies kann mit der größeren Trägheit erklärt werden. Bei 4-facher Masse verringert sich die Frequenz um den Faktor 1/2.*

Abb. 39.4 *HEINRICH HERTZ*

[1] HEINRICH HERTZ (1857 Hamburg – 1894 Bonn), deutscher Physiker. Er bestätigte experimentell die Vermutung von MAXWELL und FARADAY, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Er hat damit die Grundlagen für drahtlosen Datentransport, für Telefonie, Radio- und Fernsehtechnik entwickelt.

Beispiel 2.6

Frequenz eines Federpendels (zu Abb. 39.3):
Walter will die Frequenz eines Federpendels messen. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, misst er für 10 vollständige Perioden eine Zeit von 25 Sekunden. Nun berechnet er Frequenz und Kreisfrequenz:

$T = 2{,}5 \text{ s}$

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2{,}5 \text{ s}} = \mathbf{0{,}4\ Hz}$

$\omega = 2\pi f = 2\,\pi \cdot 0{,}4 \text{ Hz} = \mathbf{2{,}5\ s^{-1}}$

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen durchführst, dann kannst du physikalische Erscheinungsformen beobachten, physikalische Größen messen und fachgerecht festhalten, sowie Ergebnisse zu typischen Fragestellungen aus Physik und Technik errechnen:

Ü 2.14 Experiment mit Fadenpendel: Bastle ein einfaches Pendel mit einer Pendellänge von etwa 80 cm, z. B. einen Schlüssel an einer Schnur. Hänge es geeignet auf. Lass es frei auspendeln und stoppe mit der Stoppuhr deines Mobiltelefons eine gewisse Anzahl vollständiger Perioden. Führe die Zeitmessung dreimal mit verschiedenen Pendellängen durch.

Erstelle ein Protokoll mit folgenden Aufzeichnungen:

1) Kurze Beschreibung mit Skizze des Versuchsaufbaues
2) Datenaufnahme in untenstehende Tabelle
3) Berechne die Periodendauer und die Frequenz
4) Fasse deine Beobachtungen zusammen, formuliere sie in einfachen Sätzen: War die Schwingung gedämpft? Kann man von der errechneten Frequenz Schlüsse auf die Pendellänge ziehen? Begründe, warum eine bestimmte Anzahl von Perioden für die Zeitmessung gewählt wurde.

Abb. 40.1 *zu Ü 2.14*

Datenblatt Fadenpendel:

	Messwert	Errechnete Periodendauer *T* in Sekunden	Errechnete Frequenz *f* in *Hz*
1) Zeitdauer für n volle Schwingungen:			
Pendellänge in mm:			
Anzahl gemessener Perioden n:			
2) Zeitdauer für n volle Schwingungen:			
Pendellänge in mm:			
Anzahl gemessener Perioden n:			
3) Zeitdauer für n volle Schwingungen:			
Pendellänge in mm:			
Anzahl gemessener Perioden n:			

Abb. 40.2 ***Galilei-Kronleuchter*** *im Dom von Pisa zu Ü 2.16*

Übungen

Ü 2.15 **Zu Beispiel 2.6:** Walter hat bei seinem **Federpendel-Experiment** eine Frequenz von 0,83 Hz bestimmt. Veronika will das Experiment etwas abändern, um die Behauptung im Lehrbuch zu überprüfen: Die Frequenz soll auf die Hälfte sinken, wenn die Pendelmasse auf das 4-fache erhöht wird.

a) Wenn sich die Frequenz halbiert, wie groß sind dann Winkelgeschwindigkeit und Periodendauer von Veronikas Pendel mit 4-facher Masse?

b) Versuche, eine dünne lange Feder aufzutreiben (vielleicht kannst du dir eine Feder von deiner Physiklehrerin oder deinem Lehrer ausborgen) und überprüfe die Behauptung, dass ein Federpendel mit größerer Masse langsamer schwingt.

Ü 2.16 **Galilei-Kronleuchter** Einer Legende nach soll Galilei die Pendelgesetze an einem schwingenden Kronleuchter **(Abb. 40.2)** studiert haben:

Ort: im Dom von Pisa Zeit: während einer Predigt im Jahr 1581

Bei seinen Beobachtungen von Pendelbewegungen erkannte Galilei die Unabhängigkeit der Periodendauer von der Pendelmasse beim Fadenpendel.

Angenommen, Galilei habe die Periodendauer für den Leuchter mit 3,5 s abgeschätzt, wie groß wäre dann Frequenz und Kreisfrequenz gewesen?

Ü 2.17 *Dates of the* ***„Foucault-Pendelum" of the Technical Museum in Vienna:*** *17 m length of the pendulum, mass: 50 kg. What is the period of this oscillation with the frequency of 0,121 Hz ?*

Abb. 41.1 ***Foucault´sches Pendel:*** *Auf der Weltausstellung 1851 demonstrierte J.B. FOUCAULT mit Hilfe eines schwingenden Pendels, dass sich die Erde dreht. Das erregte Aufsehen und machte ihn berühmt. Das Pendel schwingt auf Grund der Trägheit immer in der selben Schwingungsebene, die Erde dreht sich unter dem Pendel weiter.*

2.2.3 Wellen *(waves)*

Befinden sich gleichartige, miteinander durch Federn verbundene Pendel nebeneinander (gekoppelte Pendel, wie in **Abb. 41.3**), so breitet sich die Schwingung immer weiter aus. Es wird eine **Welle** erzeugt.

Die Schraubenfedern übertragen die Schwingungsenergie schrittweise vom ersten Pendel auf alle weiteren Pendel.

Abb. 41.3 *Gekoppelte Pendel: Die Schwingung des ersten Pendels breitet sich durch Kopplung auf das nächste Pendel aus, eine mechanische Welle entsteht.*

Abb. 41.2 *Wasserwellen vor einer Küste*

Wellen: Wir sprechen von Wellen, wenn sich Schwingungen räumlich ausbreiten.

Merk & Würdig

Definition: Welle
Eine Welle entsteht durch Schwingungen, die durch **Koppelung** weitergegeben werden. **Die Schwingung breitet sich im Raum aus.** Dabei wird Energie transportiert. Jeder Oszillator bleibt dabei an seinem Platz. **Es erfolgt kein Materietransport.**

Abb. 41.4 ***a) Transversalwelle*** *(Seilwelle)*
b) *Eine* ***Longitudinalwelle*** *durchläuft eine Schraubenfeder.*

Beispiele für Wellen

Mechanische Wellen (*mechanical waves*)
sind Wellen, die ein Medium benötigen, um sich fortzupflanzen:

- Schall-,
- Wasser- und
- Erdbebenwellen.

Elektromagnetische Wellen (*electromagnetic waves*):
Eine wichtige Gruppe nicht mechanischer Wellen sind die **elektromagnetischen Wellen**:

- Radio- und Fernsehwellen, Licht,
- Mikrowellen (Radar),
- Wärmestrahlen (Infrarot),
- Licht und UV-Licht,
- Röntgen- und Gammastrahlen.

Sie benötigen kein Ausbreitungsmedium und können sich daher auch im Vakuum fortbewegen.

Eigenschaften von Wellen: Je nachdem, ob die Oszillatoren quer oder längs zur **Ausbreitungsrichtung** der Welle schwingen, unterscheidet man

die **Transversalwelle:** Oszillatoren schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle **(Abb. 42.1)** und

Abb. 42.1 *Transversalwelle*

die **Longitudinalwelle:** Oszillatoren schwingen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle **(Abb. 42.2)**

Abb. 42.2 *Longitudinalwelle*

- **Strahlung:** Der Begriff Strahlung wird oft synonym für Wellen verwendet.
- **Teilchenstrahlung** (*particle radiation*): Auch kleinste Teilchen im atomaren Maßstab weisen ein wellenartiges Verhalten auf, z. B. Elektronenstrahlung (Betastrahlung).
- **Wellenlänge λ** (*wavelength*):

  Um die Eigenschaften einer Welle zu verstehen, betrachten wir ihr Momentanbild **(Abb. 42.3)**:

  Alle Oszillatoren schwingen harmonisch mit der gleichen **Frequenz *f*** der Welle.

  Als **Wellenberge** bezeichnet man alle Orte, an denen die Oszillatoren gerade den oberen Umkehrpunkt erreichen. Man erkennt, dass zwischen benachbarten Wellenbergen stets der gleiche Abstand liegt. Man bezeichnet ihn als **Wellenlänge λ**. Die Welle ist zeitlich und auch räumlich periodisch. Oszillatoren, die gerade den unteren Umkehrpunkt der Schwingung erreichen, bilden **Wellentäler**.

Abb. 42.3 *Das Diagramm stellt ein* ***Momentanbild*** *einer (transversalen) Welle dar.*
Beachte: *Auf der x-Achse ist nicht wie bei der Schwingung die Zeit, sondern die Ortskoordinate x aufgetragen.*

Die **Wellenlänge λ** ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen (oder Wellentälern).

Abb. 42.4 ***„Momentaufnahmen"*** *einer Welle zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Die Welle wandert in der Zeit T (Periodendauer) um eine Wellenlänge λ in x-Richtung nach rechts.*

	c in m/s
Schall in Luft bei 20 °C	340
Schall in Helium bei 27°C	1017
Schall in Wasser	1460
Lichtgeschwindigkeit (*speed of light*) in Luft	$3 \cdot 10^8$
Licht in Wasser	$2{,}26 \cdot 10^8$
Technischer Wechselstrom	$3 \cdot 10^8$

Tabelle 42.1 *Ausbreitungsgeschwindigkeit c*

- Ausbreitungsgeschwindigkeit *c:*
  Die Wellenberge und Wellentäler wandern mit konstanter Geschwindigkeit, der Ausbreitungsgeschwindigkeit c, weiter, wie **Abb. 42.4** zeigt:

  $c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$ und mit $f = \frac{1}{T}$ erhält man die Gleichung: $\boldsymbol{c = \lambda \cdot f}$

Merk & Würdig

$\boldsymbol{c = \lambda \cdot f}$

c ... Ausbreitungsgeschwindigkeit [c] = m/s

λ ... Wellenlänge *[λ] = m*

f ... Frequenz *[f] = Hz*

Beispiel 2.7

Tsunami

Ein Tsunami jagt mit etwa 720 km/h über das offene Meer. Die Wellenlänge beträgt ca. 200 km. Zu berechnen ist die Frequenz und die Periodendauer.

Aus $c = \lambda \cdot f$ folgt

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{\frac{720}{3{,}6}\ \text{m/s}}{2 \cdot 10^5\ \text{m}} = \mathbf{0{,}001\ Hz}$$

Für die Periodendauer folgt

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0{,}001\ \text{Hz}} = \mathbf{1000\ s},$$

das sind etwa **17 Minuten**.

Abb. 43.1 *Tsunami*

Übungen

Bei der Arbeit an folgenden Übungen lernst du typische, in der Praxis auftretende Werte für Licht- und Schallgeschwindigkeit kennen.

Ü 2.18 Welche Wellenlänge hat der technische Wechselstrom von 50 Hz?
Tipp: Verwende **Tabelle 42.1.**

Ü 2.19 Berechne die Wellenlänge des **Kammertons a**.
(f = 440 Hz, c = 340 m/s)

Ü 2.20 **Mikrowellenstrahlung** wie sie in der **Mobiltelefonie (UMTS)** verwendet wird, umfasst einen Wellenlängenbereich von 11,8 bis 15,6 cm. Welchem Frequenzbereich entspricht dies?
Tipp: Verwende die Lichtgeschwindigkeit aus **Tabelle 42.1.**

2.2.4 Einführung in die Akustik *(introduction to accoustics)*

Die Akustik (die Lehre vom Schall, *science of sound*) umfasst Druckschwankungen, die sich in Medien ausbreiten. Im Frequenzbereich von 16 Hz bis ungefähr 16 kHz kann man diese Schallwellen hören. Die obere Hörgrenze ist vom Alter abhängig.

- **Klangerzeugung:** Damit ein Körper Schall erzeugt, muss man ihn durch **Energiezufuhr** zu Schwingungen anregen. Bei Musikinstrumenten kann die Anregung auf verschiedene Weisen geschehen, z. B. durch das Zupfen oder Schlagen einer Gitarrensaite.
- Ein (reiner) **Ton** schwingt mit nur einer Frequenz und wird deshalb auch als Sinuston bezeichnet.
- Die **Tonhöhe** wird durch den Grundton dominiert. Sie entspricht der tiefstmöglichen Frequenz, mit der eine Saite schwingen kann.
- Der **Klang** eines Musikinstruments hängt davon ab, wie stark die Wellenform von der Sinusform abweicht.

Abb. 43.2

Merk & Würdig

- **Schallwellen** sind mechanische Wellen.
- Sie treten auf, wenn sich **Druckschwankungen** in Materie ausbreiten.

Infraschall < 16 Hz
Hörbereich 16 Hz – 20 KHz
Ultraschall > 20 KHz
2 MHz
30 MHz

Abb. 44.1 *Frequenzbereiche des Schalls*

Sinus-Welle vom Frequenzgenerator
Violine
Piano

Abb. 44.2 *Die spezifische **Klangfarbe** eines Instruments kann in der Form der Wellen auch „sichtbar" gemacht werden. Ein Sinusgenerator erzeugt einen reinen Ton.*

Beispiel 2.8

Ausflug im Gebirge: Es blitzt und donnert. Etwa 9 Sekunden nach einem Blitz hört man den Donner.
Wie weit ist der Entstehungsort des Blitzes entfernt?

In **Tabelle 42.1** lesen wir $c = 340$ m/s ab.
Für die Schallgeschwindigkeit c gilt wie für die Geschwindigkeit v:

$$v = c = \frac{s}{t} \Rightarrow s = c \cdot t = 340\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 9\text{s} = \mathbf{3{,}06\ km}$$

Das Gewitter ist **ca. 3,1km** entfernt.

Beispiel 2.9

Micky-Maus-Stimme: Beim Einatmen eines Heliumgasgemisches erhöht sich die Stimmlage um eine Oktave (= Frequenzverdopplung). Wie verändert sich die Schallgeschwindigkeit?

Die Frequenz und damit die gehörte Tonhöhe ist über den Zusammenhang $c = \lambda \cdot f$ (siehe Seite 43) mit der Schallgeschwindigkeit c verknüpft. Unter der Annahme, dass sich die Wellenlänge der Schwingung durch das Helium-Gasgemisch nicht ändert, muss also bei einer Frequenzverdopplung auch eine **Verdopplung** der Schallgeschwindigkeit erfolgen: $c = 2 \cdot 340$ m/s = **680 m/s**

He

Abb. 44.3 *zu Beispiel 2.9*

Beispiel 2.10

Ein **Halbleiter-Einkristall** (Dicke 12,2 mm) wird mit Ultraschall geprüft.
Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit, wenn das von der Unterseite des Kristalls reflektierte Signal 6,6 µs nach dem ausgesendeten Signal zurückkommt?

Bei einem Echo legt das Signal die Strecke zweimal zurück, daher ist
$x = 2 \cdot 0{,}0122\text{ m} = 0{,}0244\text{ m}$

$$c = \frac{x}{t} = \frac{0{,}0244\text{ m}}{6{,}6 \cdot 10^{-6}\text{ s}} = \mathbf{3\,697\ m/s}$$

Die Schallgeschwindigkeit beträgt im Halbleiter **ca. 3 700 m/s**.

Anzeiggegerät
Der Schallkopf sendet Impulse und empfängt das Echo.
Gewebe
$x = c \cdot \frac{t}{2}$
Objekt

Abb. 44.4 *Beim **Impuls-Echoverfahren** sendet ein Schallkopf Impulse aus und empfängt das **Echo**.*

Ergänzung & Ausblick

Ultraschall (*ultrasonic*) > 20 kHz:

Ultraschallwellen besitzen eine sehr kleine Wellenlänge. Sie werden an Grenzflächen ähnlich wie Licht reflektiert. Daraus ergeben sich vielfältige Anwendungen:

- In der **Medizin** lassen sich Aufnahmen von inneren Organen oder Föten machen, siehe **Abb. 45.1**. (Echolotprinzip: Der Schallkopf erzeugt den Schallimpuls und empfängt das Echo. Aus der halben Laufzeit wird die Entfernung zur Grenzfläche ermittelt.)
- In der **Werkstoffprüfung zur Fehlererkennung** in Werkstoffen **(siehe Abb. 44.4)** und zur Längenmessung.
- In der **Schifffahrt** dient das Echolotprinzip zur Bestimmung der Wassertiefe.
- **Kavitation:** Ultraschallschwingungen erzeugen in Flüssigkeiten kleine Gasbläschen, die nach kurzer Zeit wieder implodieren. Dies nennt man Kavitation **(siehe Abb. 45.3).** Es kommt dabei kurzzeitig zu hohen Druckschwankungen. Dies kann zum Mischen von Stoffen (Emulsionen) und zum Reinigen verwendet werden.
- Zum **mechanischen Bearbeiten** sensibler Werkstoffe wird Ultraschall mit hoher Intensität verwendet (Bohren, Schweißen von Kunststoff).
- **Fledermäuse** und Hunde können im Ultraschallbereich Töne wahrnehmen. Fledermäuse dürften sich mittels Ultraschall ein 3D-Bild der Umgebung aufbauen.

Infraschall (*infrasonic*) < 16 Hz:

Wale „unterhalten" sich in diesem Frequenzbereich. Motorenlärm der Schiffe führt bei Walen zu „disko-artigem" Lärm in ihrem Lebensraum und stresst die Tiere.

Abb. 45.1 *Sehr deutliche Bilder ergibt das Impuls-Echoverfahren (Echolotprinzip) mit Ultraschall in der medizinischen Anwendung.*

Abb. 45.2 *The scale shows time in milliseconds.*

Abb. 45.3 ***Kavitation:*** *Man erkennt eine mikroskopisch kleine Gasblase kurz vor der Implosion.*

Übungen

Löst du die folgenden Übungen, dann kannst du an Hand eines technischen Problems einen Lösungsansatz aufstellen, die Daten aus Tabellen und Diagrammen herauslesen und ein Ergebnis errechnen.

Ü 2.21 Ein **Halbleiter-Einkristall (siehe Abb. 44.4)** wird mit Ultraschall geprüft. Ein Echo erhält man nach 1,3 µs. Dieses stammt offenbar von einer Kristallfehlstelle. In welcher Tiefe liegt diese? Verwende die Schallgeschwindigkeit aus Beispiel 2.10. **Tipp:** Beachte, dass das Signal bei einem Echo hin und zurück läuft!

Ü 2.22 ***Ultrasonic echoes:*** *You have the information given in the diagram* ***(Abb. 45.2).*** *Find out how long it took for ultrasound to travel to the sea bed and back. The speed of sound in water is about 1500 m/s. Calculate the depth of water below the bottom of the boat.*

Ü 2.23 **Micky-Maus-Stimme:** Im Beispiel 2.8 wird behauptet, dass sich die Schallgeschwindigkeit verdoppelt und es wird ein Wert angegeben. Überprüfe das Ergebnis mit Hilfe von **Tabelle 42.1** und argumentiere mögliche Ursachen der Abweichung.

- **Schallintensität *I*** (*intensity of sound*): Eine Schallquelle mit der Leistung P sendet Wellen aus. Dabei wird Energie E pro Zeit t transportiert. Die Leistung pro durchströmter Fläche A wird als Schallintensität I bezeichnet. Für den Fall, dass die Fläche **senkrecht** zur Ausbreitungsrichtung durchströmt wird, gilt:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{E}{t \cdot A}$$

I … Schallintensität, $[I] = W/m^2$

P … Schallleistung, $[P] = W$

t … Zeit, $[t] = s$

A … Fläche, $[A] = m^2$

E … Energie des Schalls, $[E] = J$

Abb. 45.4 ***Schallintensität I:*** *Leistung P der Schallquelle pro durchströmter Fläche A.*

Ergänzung & Ausblick

Der Begriff Intensität ist eine in vielen Gebieten der Physik verwendete Größe:

- Strahlungsintensität,
- Lichtintensität,
- Intensität von radioaktiver Strahlung …

Unter Intensität versteht man immer das Verhältnis von Leistung P zur Fläche A, die im rechten Winkel durchstrahlt wird.

Schallwellen breiten sich auf Kugelflächen um eine Schallquelle aus.

r_1

Schallquelle

r_2

Abb. 46.1 ***Kugelcharakteristik*** *einer Schallquelle: Die Flächen gleicher Schallintensität sind kugelförmig, wie Zwiebelschalen, angeordnet.*

Ergänzung & Ausblick

- **Kugelcharakteristik:** Bei verschiedenen Phänomenen kann eine Abnahme einer physikalischen Größe mit dem Abstand zum Quadrat festgestellt werden. Beispielsweise erfolgt die Ausbreitung von **Wärme- und Lichtstrahlung** nach analogen mathematischen Gesetzmäßigkeiten wie die Gravitation, die Kraft, die zwischen Sternen und Planeten wirkt.

  Die Ursache dieser Ähnlichkeit liegt darin, dass in all diesen Fällen rein geometrische Gründe vorliegen: die Kugelcharakteristik der Quelle (siehe Abb. 46.1).
- **Dämpfung:** Die Schallintensität nimmt nicht nur aus geometrischen Gründen ab, sondern **zusätzlich** auch wegen Energieverlusten im Ausbreitungsmedium. Dies nennt man Dämpfung.

- **Abstandsgesetz:** Wie nimmt die Intensität mit dem Abstand von der Schallquelle ab?

  Wenn sich der Schall ausbreitet, dann muss die Schallenergie ein zunehmend größer werdendes Raumgebiet ausfüllen. Der Schalldruck nimmt dabei entsprechend ab.

  Ist die Schallquelle ein **Kugelstrahler** (die Flächen gleicher Schallintensität sind dann kugelförmig, siehe **Abb. 46.1**), dann muss dieselbe Schallleistung P in kleinerer Entfernung r_1 kleinere Kugeloberflächen und in größerer Entfernung r_2 größere Kugeloberflächen durchdringen. Die Intensitäten betragen an den Kugelflächen mit Radius r_1 und r_2:

  $I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}$ bzw. $I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$

  ($A = 4\pi r^2$ ist die Formel für die Oberfläche einer Kugel.)

  Die Verhältnisse betragen:

  $$\frac{I_1}{I_2} \text{ bzw. } \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

  Die Schallintensitäten verhalten sich umgekehrt zum Quadrat ihrer Abstände.

  Anders ausgedrückt kann man auch schreiben: Die Schallintensität nimmt mit dem Quadrat des Abstands von der Schallquelle ab:

  $I \sim 1/r^2$

  Das folgende Beispiel zeigt, wie man mit diesem Gesetz umgehen kann:

Beispiel 2.11

Silvesterknallkörper

Wie groß ist die Intensität für eine unmittelbar neben dem Knallkörper stehende Person (r_1 = 1 m)?

Bei einem **Silvester-Knallkörper** wird von einem Mikrophon in einer Entfernung von 10 m eine Intensität von 0,1 W/m² gemessen.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow I_1 = \frac{I_2 \cdot r_2^2}{r_1^2} = \frac{0{,}1\text{W/m}^2 \cdot (10\text{m})^2}{(1\text{m})^2} = \mathbf{10W/m^2}$$

Beachte: Die Explosion eines Knallkörpers kann bei einer unmittelbar daneben stehenden Person zu bleibenden Gehörschäden führen!

- **Lautstärke** (*loudness*):

  Das Ohr des Menschen kann bei einem Musikinstrument unterscheiden, ob es
  - hoch oder tief klingt (Tonhöhe),
  - eher dumpf oder klirrend klingt, also welche Art von Klang das Instrument hat,
  - laut oder leise klingt (**Lautstärke**).

- **Schallpegel *L*** (*noise level*):

  Vor allem wenn es um Lärmbelästigung geht, sollte möglichst exakt messbar sein, ob etwas laut oder leise klingt. Messgeräte, die im Bereich der „Lärmmessung" eingesetzt werden, zeigen den sogenannten **Schallpegel *L*** in der Einheit „Dezibel" an: $[L] = dB$

  Zusammenhang zwischen Schallpegel und Schallintensität:

  Eine große Schallintensität wird lauter wahrgenommen als eine kleine. Bei Verdoppelung der Schallintensität (also beispielsweise zwei gleich laute Mopeds in gleicher Entfernung) erhöht sich der Schallpegel um 3 dB. Dies ist deutlich wahrnehmbar, aber **nicht** doppelt so laut!

- **Lautstärke und Frequenz:** Will man aber tatsächlich ergründen, ob ein Lärm als laut oder leise empfunden wird, dann muss unter anderem auch noch bedacht werden, dass tiefe Töne weniger laut empfunden werden als höhere Töne: Am empfindlichsten ist das menschliche Ohr im Frequenzbereich von 2 000 bis 5 000 Hz.

Lärm am Arbeitsplatz:

Lärm am Arbeitsplatz verringert die Produktivität, fördert Fehlleistungen und Unfälle. Schwerhörigkeit ist die häufigste Berufskrankheit in Österreich (bei Männern)!

Abb. 47.1 ***Schallpegel***
Ein Schallpegel von 90 dB wird sehr laut empfunden. An einem Arbeitsplatz sind 90 dB nur für kurze Zeit erlaubt, da sonst Gehörschäden drohen.

Thema & Gesellschaft

- **Man kann zwar wegschauen, aber nicht weghören.**
- Schallereignisse emotionalisieren und bewirken eine **Stressreaktion: Lärm löst im menschlichen Körper Alarm aus!**
- Lärm zur **„Angstbewältigung"**: Obwohl jedermann weiß, dass Lärm schädigt, benutzen manche Menschen den Lärm wie eine Droge! Psychologen haben hinter diesem Phänomen einiges aufgespürt. „Die Totenstille ist dem Menschen unheimlich. Warum?", fragt der berühmte Psychologe C. G. Jung. Viele uralte Abwehrbräuche vertreiben alles Böse sehr lautstark, mit Poltern und Getöse. Denken wir an Silvester.
- Lärm hebt auch das **Selbstwertgefühl**: Discosound – hier hilft die aufputschende Wirkung der Stresshormone.

Übungen

Ü 2.24 Beim Ausfüllen des folgenden Lückentextes überprüfst du im Bereich der Akustik, ob du die Fachausdrücke beherrschst:

Werden periodische ________________schwankungen in einem Ausbreitungs ________________ weitergeleitet, dann spricht man von Schall. Wenn ein Klang hoch klingt, dann ist der Wert der________________ in *kHz* hoch. Die Schallleistung, die pro Fläche von einer Schallquelle ausgeht, wird ________________ genannt. Mit der Einheit *dB* misst man den ________________ . Ob Schall laut oder leise empfunden wird, hängt nicht nur von der Intensität, sondern auch von der ________________ des Lärms ab. Die Schallintensität nimmt mit dem Abstand zur Quelle ________________.
Um welchen Wert nimmt die Schallintensität ab, wenn man den Abstand zur Quelle verdoppelt? Antwort: ________________

Abb. 47.2 *„Musik wird störend oft empfunden, weil sie stets mit Lärm verbunden."*
WILHELM BUSCH

Ü 2.25 Löst du diese Übung, dann kannst du an Hand eines technischen Problems Diagramme zeichnen, Werte herauslesen und eine persönliche Schlussfolgerung daraus ziehen:

A sound-level meter is used to find the noise level (in decibels, dB) at different distances from a disco loudspeaker:

Distance (m)	1	2	4	8	16
Noise level (dB)	130	120	110	100	90

Plot a graph and use it to find the noise level at 6 m. Is this distance safe for your ears?

Experiment

Spektralfarben

Mit einem Glasprisma kannst du das Licht in die Spektralfarben zerlegen.

Abb. 48.1

Abb. 48.2 ***Additive Farbmischung:*** *Drei einfärbige Lichtquellen mischen sich zu weißem Licht.*

Abb. 48.3 ***Subtraktive Farbmischung:*** *Farbige Filter werden übereinander gelegt und mit weißem Licht angestrahlt. Das durchtretende Licht leuchtet in den subtraktiven Mischfarben.*

2.2.5 Das Phänomen Licht

Unter dem sichtbaren Licht versteht man jenen Bereich der elektromagnetischen Wellen, der mit unseren Augen wahrgenommen wird.

Experimente mit Glasprismen zeigen, dass weißes Licht in die „Regenbogenfarben" zerlegt werden kann. Diese Erscheinung nennt man **Dispersion** des Lichts.

- Weißes Licht kann als „Summe" der Spektralfarben verstanden werden.
- Den unterschiedlichen Farben können jeweils bestimmte Wellenlängen zugeordnet werden:

Spektralfarben		
Rot	> 630 mm	
Gelb	570 – 580 nm	
Grün	500 – 550 nm	
Cyan	um 490 nm	
Blau	450 – 480 nm	
Magenta	380 – 400 nm	
... und 2 unbunte Farben		
Schwarz		
Weiß		

Tabelle 48.1 *Den Spektralfarben kann man Wellenlängen zuordnen.*

- **Additive Farbmischung** (*additive mixture of colours*):

  Für die additive Farbmischung ist es notwendig, dass die Strahlung direkt von der Quelle in das Auge trifft. Drei verschiedene Typen von Farbzellen der Netzhaut reagieren empfindlich auf verschiedenfarbiges Licht. Die „Summierung" der Empfindung erfolgt im Gehirn. Mischt man die Grundfarben **Rot**, **Grün** und **Blau**, erzielt man weißes Licht **(Abb. 48.2)**. Durch geeignete Kombination der drei Grundfarben kann aber auch jede beliebige Farbe erzeugt werden.

  Anwendung: Bildschirm und Projektoren!

- **Subtraktive Farbmischung** (*subtractive mixture of colours*):

  Fällt Licht auf einen Körper, dann werden bestimmte Anteile absorbiert, der Rest wird reflektiert: Wir sehen die Farbe des Gegenstandes. „Farben" (Malerfarbe, Lack) enthalten Farbpigmente, die bestimmte Wellenlängen absorbieren.

  Mischt man „Farben", dann erscheint die entstehende Mischfarbe dunkler und es entsteht im Auge ein neuer Farbeindruck.

  Aus den Grundfarben der subtraktiven Farbmischung (Magenta, Gelb und Cyan) kann je nach Mischungsverhältnis der gewünschte Farbeindruck gemischt werden **(Abb. 48.3)**.

  Anwendung: Farbdruck; dabei wird, um schärfere Konturen zu erhalten, noch reines Schwarz als weitere Druckfarbe dazugemischt.

- **Lichtgeschwindigkeit** (*speed of light*):

  Die Ausbreitungsgeschwindigkeit für Licht ist die wichtigste Fundamentalkonstante der Physik. Sie beträgt im Vakuum ungefähr[1]:

  $c \approx 3 \cdot 10^8$ **m/s**

  In anderen Medien ist c kleiner **(siehe Tabelle 42.1)**.

Merk & Würdig

Das Lichtjahr ist **keine** Zeit, sondern eine **Entfernung**!
Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr in Vakuum zurücklegt!
Wie weit ist das? (siehe Beispiel 1.8, Seite 24)

[1] Die **Lichtgeschwindigkeit** im Vakuum beträgt exakt: $c = 299\,792\,458$ **m/s**.

Beispiel 2.12

Grünes Licht (560 nm)
Wie groß ist die Frequenz?

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{560 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5{,}36 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = \mathbf{536\ THz}$$

Übungen

Beim Lösen folgender Beispiele verwendest du die wichtigste Fundamentalkonstante der Physik und lernst typische Zahlenwerte kennen, wie sie im Zusammenhang mit Licht auftreten:

Ü 2.26 Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts liegen etwa im Bereich von 400 nm (blau) bis 800 nm (rot). Welchen Frequenzbereich überstreicht das sichtbare Licht?

Ü 2.27 Berechne die Länge eines Lichtjahres in Metern und als Vielfaches der Astronomischen Einheit[1)] (AE).

2.2.6 Beispiele für „optische Größen"

- **Der Helligkeitseindruck von Licht**

  Neben der Farbe von Licht interessiert auch die Helligkeit, mit der eine Lichtquelle strahlt oder mit der ein beleuchtetes Objekt leuchtet. Kauft man heute eine Sparlampe oder eine LED, sollte man über Größen wie Lichtstrom oder Farbtemperatur Bescheid wissen **(siehe Tabelle 49.1)**.

  Die Helligkeit, mit der wir etwas wahrnehmen, ist von der **Empfindlichkeit** des menschlichen **Auges** abhängig. Wir sehen im Bereich des grünen Lichts am besten **(siehe Abb. 49.1)**.

- **Der Lichtstrom** ***Φ*** (*luminous flux*) wird in in **Lumen** ***(lm)*** gemessen. Er ist die vom Auge bewertete Lichtleistung, die von einer Lichtquelle abgestrahlt wird.

  Die spektrale Hell-Empfindlichkeit **(Abb. 49.1)** des Auges[2)] geht damit in diese Größe ein:

  Der **Lampenlichtstrom** ist die **gesamte abgegebene bewertete Lichtleistung** einer Lampe unabhängig von der Ausstrahlungsrichtung.

Lichtquelle	Lichtstrom in *lm*
Energiesparlampe 11 W	600 lm
Weiße High-Power-LED 10 W (Kühlkörper notwendig)	900 lm
Glühlampe 75 W	800 lm
Leuchtstoffröhre 11 W	900 lm
Natriumlampe 250 W (Vorschaltgerät notwendig)	23 000 lm

Tabelle 49.1 *Beispiele für Lichtstrom Φ*

Abb. 49.1 *Die* ***spektrale Empfindlichkeit*** *des helladaptierten menschlichen Auges*

Abb. 49.2 *In* ***Lumen*** *wird der* ***Lichtstrom*** *von Lampen und Projektoren gemessen. Dieser ist das Maß für die gesamte (vom Auge bewertete) Lichtleistung, die das Gerät abgibt. Der Lichtstrom ist* ***unabhängig*** *von Projektionsabstand und Ausstrahlungswinkel!*

1) Eine **Astronomische Einheit (AE):** Sie hat eine Länge von rund 149,6 Millionen Kilometern und ist eine der wichtigsten Einheiten in der Astronomie. Vereinfacht ausgedrückt ist die AE der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne.

2) Im Maximum der Augenempfindlichkeit bei 555 nm entspricht 1 W Strahlungsleistung einem Lichtstrom von 683 lm.

Öffnungswinkel eines Kegels in Grad **(siehe Abb. 50. 1)**	**Raumwinkel Ω in *sr***
Volle Kugel 360°	4π
Halbkugel 180 °	2π
Spot mit 90°	1,84
65,57°	1
Halogenstrahler mit 20°	0,1

Tabelle 50.1 *Beispiele für Raumwinkel Ω*

Abb. 50.1 ***Raumwinkel***
Die eingezeichnete Kugeloberfläche (gewölbte Kreisfläche) habe eine Fläche von $A = 1m^2$ und einen Radius $r = 1m$. Verbinden wir nun den Rand der Fläche mit dem Licht-Zentrum, dann überstreichen die Verbindungslinien einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von $\alpha = 65{,}55°$.
Diesem Öffnungswinkel $\alpha = 65{,}55°$ entspricht ein Raumwinkel von $\Omega = 1sr$.

- **Der Raumwinkel *Ω*** (*solid angle*)

  Leuchten strahlen das Licht in verschiedene Richtungen verschieden stark aus. Um dies mit unserem Helligkeitsempfinden in Einklang zu bringen, muss die Richtungsabhängigkeit beachtet werden. Dafür benötigt man eine Winkelgröße, die im Raum anwendbar ist und nicht nur in der Ebene. Diese heißt **Raumwinkel**:

  – Als **Raumwinkel *Ω*** bezeichnet man das Verhältnis des Ausschnitts einer Kugeloberfläche zum Quadrat des zugehörigen Kugelradius:

  $$\Omega = \frac{A}{r^2};$$

  $[\Omega] = m^2/m^2 = 1 = sr$ (Steradiant)
  A … Ausschnitt der Kugeloberfläche, $[A] = m^2$,
  r … Radius, $[r] = m$

  – Um den Wert eines Raumwinkels von dem eines ebenen Winkels unterscheiden zu können, fügt man dem Wert des Raumwinkels noch die SI-Einheit *sr* (**Steradiant**) an.

  – Diese Definition ist eine dreidimensionale Erweiterung des „normalen“ zweidimensionalen Winkels im Bogenmaß.

Beispiel 2.13

Maximaler Raumwinkel

Die Flamme einer Haushaltskerze emittiert rundherum (über die ganze Kugeloberfläche) in den sie umgebenden Raum einen gewissen Lichtstrom (unabhängig vom Winkel!).

Wir ummanteln gedanklich die Kerze mit einer Kugel, die den Radius von 1 m besitzt und deren Mittelpunkt die Flamme ist. Wie groß ist der gesamte Raumwinkel?

Die Oberfläche dieser Kugel (der gesamte Raumwinkel) beträgt $4\pi r^2 = 12{,}566\ m^2$ und stellt die oberste Grenze des Raumwinkels dar.

Der größtmögliche Raumwinkel ist $\boldsymbol{\Omega = 4 \cdot \pi\ sr = 12{,}566\ sr}$.

- **Lichtstärke I_v** (*luminous intensity*) in Candela *(cd)*:

  Die Lichtstärke ist der in einer bestimmten Richtung in einen Raumwinkel ausgestrahlte **Lichtstrom** bezogen auf diesen Raumwinkel:

  $$I_v = \frac{\Phi}{\Omega}$$

  Lichtstärke $I_v = cd$ (Candela)
  Raumwinkel Ω, $[\Omega] = 1 = sr$
  Lichtstrom Φ, $[\Phi] = lm = cd \cdot sr$
  1 Candela *(cd)* entspricht etwa der Lichtstärke einer Kerzenflamme.

  Candela[1] ist eine SI-Basiseinheit!

Beispiel 2.14

Lichtstrom einer Kerze

Eine Kerze hat eine Lichtstärke von etwa 1 cd. Welchem Lichtstrom entspricht dies? (Annahme: Das Kerzenlicht strahlt isotrop in alle Raumrichtungen in gleichem Maß.)

Aus der Annahme ergibt sich: $\Omega = 4\pi$ sr; somit strahlt diese Kerze mit einem Lichtstrom von:

$$I_v = \frac{\Phi}{\Omega} \Rightarrow \Phi = I_v \cdot \Omega = 1\ cd \cdot 4\ \pi sr = \mathbf{12{,}6\ lm}$$

[1] Candela: **SI- Basiseinheit.** Eine Lichtquelle hat in einer gegebenen Raumrichtung 1 cd **Lichtstärke**, wenn sie auf einem Sensor mit der genormten spektralen Empfindlichkeitsverteilung des menschlichen Auges dasselbe Signal erzeugt wie monochromatisches (grüngelbes) Licht der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz und der Leistung pro Raumwinkel von $\frac{1}{683}$ W/s.

Übungen

Löst du die folgenden Übungen, dann kannst du an Hand eines technischen Problems einen Lösungsansatz aufstellen, die Daten abschätzen und ein Ergebnis errechnen.

Ü 2.28 Wie „groß“ ist der Mond? – Besser formuliert: Unter welchem Raumwinkel erscheint der Mond? **Tipp:** Im wahrsten Sinn des Wortes kannst du hier mit dem Daumen schätzen: Bei ausgestrecktem Arm (ca. 1 m Entfernung) weist der Mond etwa Daumennagelgröße (1 cm²) auf.

Ü 2.29 Großbild-Leinwand: Wie groß ist der Raumwinkel, unter dem 3D-Filme auf der 600 m² großen Projektionsleinwand betrachtet werden können? (Schätze die Entfernung Projektor-Leinwand ab oder recherchiere deren Größe im Internet.)

- **Beleuchtungsstärke *E*** (*lighting intensity*):
  Die Beleuchtungsstärke *E* ist ein Maß für die Helligkeit einer beleuchteten Fläche. Sie gibt das Verhältnis des auffallenden Lichtstroms zur beleuchteten Fläche an:

$$E = \frac{\Phi}{A_n}$$

Beleuchtungsstärke *E*; $[E] = lm/m^2 = 1\ lx$ *(lux)*

Φ … Lichtstrom, $[\Phi] = lm$

A_n … Fläche senkrecht zum Lichtstrom, $[A_n] = m^2$

Die Beleuchtungsstärke beträgt 1 lx, wenn der Lichtstrom 1 lm auf eine Fläche von 1 m² gleichmäßig auftrifft. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass das Licht normal auf die Fläche fällt!

Beispiel	Beleuchtungsstärke *E*
Heller Sonnentag	10^5 lx
Im Schatten im Sommer	10^4 lx
Büro-/Zimmerbeleuchtung	300 – 500 lx
Straßenbeleuchtung	10 lx
Kerze ca. 1 Meter entfernt	1 lx
Vollmondnacht	0,25 lx

Tabelle 51.1 *Beispiele für Beleuchtungsstärken*

Abb. 51.1 *Zusammenhang zwischen der* ***Beleuchtungsstärke E*** *(in lx) und dem* ***Abstand r*** *(in m). Man erkennt, dass die Beleuchtungsstärke mit dem Radius zum Quadrat kleiner wird!*

Merk & Würdig

Raumwinkel Ω

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

[Ω] = 1sr (Steradiant)

Lichtstärke I_v

$$I_v = \frac{\Phi}{\Omega}$$

$I_v = cd$ *(Candela)*

Beleuchtungsstärke E

$$E = \frac{\Phi}{A_n}$$

$[E] = lx$ (Lux)

Lichtausbeute η

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

$[\eta] = lm/W$

Φ … Lichtstrom, $[\Phi] = lm$ (Lumen)

A … Kugelflächenausschnitt, $[A] = m^2$

r … Kugelradius, $[r] = m$

A_n … Fläche senkrecht zum Lichtstrom, $[A_n] = m^2$

P … elektrische Leistung, $[P] = W$

Die Beleuchtungsstärke nimmt mit dem Abstand zum Quadrat ab! (siehe Abb. 51.1)

Beispiel 2.15

Martin liest bei Kerzenschein:

Martin empfindet Kerzenschein als angenehmes Licht. Reicht die Helligkeit aus, um ein Buch lesen zu können? Das Buch befindet sich 75 cm von der Kerze entfernt so geneigt, dass das Licht senkrecht einfallen kann. Der Lichtstrom einer Kerze beträgt ca. 12 lm (siehe Beispiel 2.14).

Als Fläche A_n muss die gesamte Kugeloberfläche in 0,75 cm Entfernung eingesetzt werden! Begründung: Eine Kerze ist eine Lichtquelle mit einer isotropen räumlichen Lichtausbreitung, sodass der Lichtstrom von 12 lm in allen Richtungen eine Fläche gleichmäßig beleuchtet. Martins Buchseite ist ein Teil davon.

Im Abstand von 0,75 m beträgt die Beleuchtungsstärke *E:*

$$E = \frac{\Phi}{A_n} = \frac{\Phi}{4\pi \cdot r^2} = \frac{12\ lm}{4\pi \cdot (0{,}75\ m)^2} = \mathbf{1{,}7\ lx}$$

Das Ergebnis: Die weiße Buchseite ist (das zeigt ein Selbstversuch) zum Lesen gerade noch ausreichend beleuchtet. Allerdings strengt diese geringe Beleuchtungsstärke die Augen beim Lesen sehr an. Für Büroarbeiten sind Beleuchtungsstärken von 300 – 500 Lux gesetzlich vorgesehen!

Lichtquelle	Lichtausbeute
Natriumdampflampen	200 lm/W
Weiße LED	bis zu 150 lm/W
Leuchtstoffröhren	80 lm/W – 100 lm/W
Halogenlampen	bis zu 35 lm/W
Glühlampen	10 lm/W – 20 lm/W

Tabelle 52.1 *Beispiele für Lichtausbeute*

- **Lichtausbeute η** (*lamp efficacy or efficiency*):

  Die Lichtausbeute gibt an, wie effizient eine Lampe die aufgenommene elektrische Energie in Licht umsetzt. Die Lichtausbeute ist also der Wirkungsgrad für Lichtquellen:

  $$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

  $[\eta] = lm/W$

  Aus **Tabelle 52.1** können aktuelle Daten abgelesen werden.

Ergänzung & Ausblick

- **Lichtausbeute:** In **Tabelle 52.1** erkennt man den beträchtlichen Unterschied der Lichtausbeute zwischen Glühlampen und anderen Lampen. Offenbar ist hier **Energiesparpotential** enthalten!
- **Die Lichtausbeute** wird oft in **Energieeffizienzklassen** angegeben: Die Klasse A steht für „gut"; die Klasse G für „ganz böse", siehe **Abb. 52.1**.

Abb. 52.1 *Energieeffizienzklassen*

Lichtquelle	Farbtemperatur
Kerzenlicht	2 000 K
Glühbirne	2 800 K
Halogenlampe	3 400 K
Bedeckter Himmel	6 500 K – 7 500 K
Blaues Himmelslicht	9 000 K – 18 000 K

Tabelle 52.2 *Beispiele für Farbtemperaturen*

- **Farbtemperatur** (*colour temperature*)

  Die Farbe von Lichtquellen ist schwer durch ihre Lichtwellenlänge anzugeben, da das gesamte **Ausstrahlungsspektrum** zu berücksichtigen ist. Weißes Licht mit hohem Rotanteil wird als warmfarbig und mit hohem Blauanteil als kaltfarbig bezeichnet. Für die Beleuchtungstechnik sind diese Unterscheidungen allerdings zu ungenau. Messtechnisch zugänglich ist die sogenannte **Farbtemperatur** (Einheit Kelvin), die auf folgendem Experiment beruht:

Experiment

Abb. 53.1 *Das Experiment zeigt, dass bei einer Temperatur von ca. 500 °C (= 773 K) Metall rot zu glühen beginnt und damit sichtbar strahlt.*

Beachte: Man darf sich bei Farbtemperaturwerten nicht von der alltäglichen Erfahrung verwirren lassen: **Rotes Licht ist physikalisch gesehen „kälter" (= energieärmer) als blaues Licht!**

Merk & Würdig

Als **Farbtemperatur** einer Lichtquelle bezeichnet man die Temperatur, die ein Körper (z. B. ein glühendes Metall) haben müsste, um den gleichen Farbeindruck wie die Lichtquelle zu erzeugen. Die Temperatur wird dabei in Kelvin angegeben.

Übungen

Beim Lösen des Suchspieles überprüfst du im Bereich der Lichttechnik, ob du physikalische Größen und deren Einheiten beherrschst, die auch im Alltag verwendet werden:

Ü 2.30 Eine 100-W-Glühlampe hat eine Lichtausbeute von 20 lm/W. Welcher Lichtstrom und welche Lichtstärke lassen sich damit erreichen? (Voller Raumwinkel)

Ü 2.31 Teste dich selbst! Wenn du mehr als 5 Punkte erreichst, dann weißt du über wichtige Konsequenzen von naturwissenschaftlichen Ergebnissen, die das Kapitel Licht betreffen, Bescheid. Du kannst auch deine persönliche Position zu einem gesellschaftlichen Thema darstellen und begründen:

a) Der Helligkeitseindruck einer Lichtquelle wird durch
- ☐ die Leistung in Watt definiert
- ☐ die Farbtemperatur in Kelvin angegeben
- ☐ den Lichtstrom in Lumen beschrieben
- ☐ meinen persönlichen Eindruck festgelegt

b) Ob ein Arbeitstisch hell genug ausgeleuchtet ist, wird durch folgende Größe festgelegt; durch
- ☐ die Größe der Arbeitsfläche in m²
- ☐ die Entfernung Lichtquelle – Tisch in Meter
- ☐ die Beleuchtungsstärke in Lux
- ☐ die Lichtstärke in Candela

c) Ein Raumwinkel kann maximal folgenden Wert erreichen:

☐ 360° ☐ 4π ☐ 2π ☐ 12,57 sr

d) Deine Großmutter macht sich in einem Gespräch mit dir Sorgen, dass sie für ihren Kronleuchter keine 25 W Kerzenlampen mehr enthält. Wie reagierst du?
- ☐ Ärgerlich, du schimpfst über die EU-Verordnung.
- ☐ Du beruhigst sie und behauptest, dass es für Lampen unter 40 W keine Kaufeinschränkungen geben wird.
- ☐ Du rätst deiner Großmutter, möglichst auf Vorrat Glühbirnen zu kaufen.
- ☐ Du behauptest, dass es Kerzenlampen, die energieeffizient arbeiten gibt, die leider noch teuer sind.

e) Die Farbtemperatur ist
- ☐ die höchste Temperatur (in Kelvin), die eine LED erreichen kann
- ☐ ein Maß für die Lichtausbeute
- ☐ ein Maß für den Farbeindruck einer Lichtquelle
- ☐ die Temperatur einer Heizquelle in Kelvin

Mehrfachantworten möglich

Abb. 53.2

Diskutiere mit! Folgende Zitate findet man in den heimischen Printmedien zum Thema Glühlampe:

- **Aus für Glühlampen!** Hamburg – Gabriel (SPD) fordert EU-Standards gegen herkömmliche Glühbirnen. „Der Standort Europa kann sich eigentlich keine Produkte mehr leisten, die wie herkömmliche Glühbirnen einen Effizienzgrad von nur fünf Prozent aufweisen" (Bild am Sonntag, Februar 2007).

- **Sind Glühbirnen eine Fehlkonstruktion?** Eine Glühbirne wandelt nur drei bis fünf Prozent der Energie in Licht um, der Rest geht als Wärmestrahlung verloren. Energiesparlampen haben eine längere Lebensdauer und verbrauchen bis zu 80 % weniger Strom. Studien zufolge könnten Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr vermieden werden, wenn Glühbirnen durch Energiesparlampen oder durch LED ersetzt würden.

- **Energiesparlampen giftig!** Energiesparlampen sind giftig, wenn sie zu Bruch gehen – das stellt eine Untersuchung des Umweltbundesamtes fest. Deshalb fordern führende EU-Abgeordnete wieder die Absetzung des Verbotes der Glühbirne. Die Gesundheit der Verbraucher müsse oberste Priorität haben.

- **Ordentlich entsorgen!** Der österreichische Umweltminister Nikolaus Berlakovich wird in der Zeitschrift „profil" im März 2009 zitiert: „Für den Klimaschutz ist es wichtig, dass alte Glühbirnen durch energiesparende Lampen ersetzt werden." Immerhin sieht auch der Umweltminister in einem Punkt noch Handlungsbedarf. Der Quecksilbergehalt in den Energiesparlampen werfe Probleme auf. „Es wird daher notwendig sein, in einer Informationsoffensive den Menschen die richtige Entsorgung nahezubringen".

- **Was sind LEDs?**
  Sind LEDs in der Herstellung „Umweltbomben"?
  Recherchiere diese Fragen im Internet!

Abb. 54.1

Abb. 54.2

- Egal, ob man sich für Energiesparlampen oder LEDs entscheidet, etwas gewöhnungsbedürftig sind die neuen Bezeichnungen der Leuchtmittel.

- Die „**Helligkeit**" wird in **Lumen** angegeben, der Einheit für den Lichtstrom. Eine 75-Watt-Glühbirne bringt es auf etwa 800 Lumen.

- Auch gibt es verschiedene „**Lichttöne**" zu kaufen: die **Farbtemperatur** wird in Kelvin *(K)* angegeben. Je höher die Farbtemperatur, desto brillanter, aber auch kälter der „Lichtton". 2 600 Kelvin entsprechen etwa einer Glühbirne mit ihrem „warmen" Licht. Tageslicht-Weiß hat etwa 6 000 Kelvin.

2.3 Ausgewählte Kapitel der Thermodynamik

Die Wärmelehre befasst sich mit Phänomenen, die eng mit dem Temperaturbegriff (*temperature*) verknüpft sind. Die **Thermodynamik** ist jenes Teilgebiet der Wärmelehre, das sich mit der Umwandlung von Energie beschäftigt. Sie liefert das theoretische Rüstzeug, mit dem Verbrennungsmotoren konstruiert werden.

2.3.1 Die Temperatur (*temperature*)

Der Begriff Temperatur ist eng mit unserer Empfindung für „heiß" oder „kalt" verbunden. In der Physik ist jedoch ein objektives Maß notwendig. Hier ist die Temperatur eine Grundgröße (siehe Kapitel 1.2). Sie beschreibt den Wärmezustand eines physikalischen Systems (z. B. einer Flüssigkeit oder eines Gases). Sie wird als Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen eines Systems aufgefasst. Die Temperatur ist also ein Maß für die Stärke der thermischen Bewegung der Moleküle.

Das Messen der Temperatur ist möglich, wenn man eine Einheit festlegt. In unserem Kulturkreis sind folgende Temperaturskalen gebräuchlich:

- **Celsiusskala**[2]

  1° C entspricht dem hundertsten Teil der Temperaturdifferenz zwischen dem Gefrierpunkt des Wassers (= 0° C) und dem Siedepunkt des Wassers (= 100° C).

- **Kelvinskala**[3]

  Da die thermische Bewegung der Moleküle bei –273° C aufhört, ist es naheliegend, eine Temperaturskala mit dem Nullpunkt bei –273° C zu wählen: die **absolute** Temperatur. Es gilt: 0 K = –273° C

Merk & Würdig

Absolute Temperatur *T*

$[T] = K$ … Kelvin, Basiseinheit im SI-System

$[\vartheta] = °C$ … Grad Celsius[1]

Die Temperaturdifferenz 1 K ist gleich groß wie die Temperaturdifferenz 1° C.

Merk & Würdig

0 K = –273° C

$T = (273 + \vartheta/°C)$ K

$\Delta T = \Delta \vartheta$

Temperatur *T* (in Kelvin) und Arbeitsbereiche der Physik

typische Arbeitsbereiche	*T* (K)	Beispiele
Kosmologie, Astrophysik	10^{10}	Höchste mögliche Temperatur; Zentrum der heißesten Sterne
	10^{8}	H-Bombenexplosion; Plasma bei Fusionsexperimenten; Zentrum der Sonne
Plasmaphysik	10^{6}	Korona der Sonne
Technik	10^{4}	Sonnenoberfläche; Metalle schmelzen, chemische Vorgänge; Lebensvorgänge
Kryophysik	10^{2}	Verflüssigung von Gasen; Weltraumtemperatur
	10^{0}	
	10^{-2}	
	10^{-4}	
	10^{-6}	tiefste im Labor erreichte Temperatur

In der „Tieftemperaturphysik" treten Phänomene wie Supraleitung (Verlust des elektrischen Widerstandes) und Suprafluidität (Verlust der inneren Reibung) auf.

Alltagserfahrung, Naturbeobachtung

Abb. 55.1

[1] ϑ (theta) ist die Abkürzungen für Temperaturen, gemessen in ° C.
[2] ANDERS CELSIUS (1701 – 1744), schwedischer Astronom. Er engagierte sich für die Einführung des gregorianischen Kalenders in Schweden; außerdem bestimmte er die Helligkeit von Sternen und war Mitglied einer Expedition nach Lappland.
[3] Sir WILLIAM THOMSON (Lord KELVIN) (1824 – 1907), britischer Mathematiker und Physiker. Er lieferte grundlegende Beiträge zur Thermodynamik. Er wurde in der Westminster Abtei neben Newton beigesetzt.

Abb. 56.1 *Experiment mit einem Kalorimeter; mit dieser Anordnung lässt sich die spezifische Wärmekapazität c von Wasser bestimmen.*

Stoff	Spezifische Wärmekapazität in *J/kgK*
Wasser	4 187
Eisen	460
Holz	1 760
Kupfer	380
Ziegel	≈ 920

Tabelle 56.1

2.3.2 Wärme und Energie *(heat and energy)*

Wenn man eine bestimmte Menge Wasser in einem Kalorimeter (das ist ein thermisch isoliertes Gerät, siehe **Abb. 56.1**) mit Hilfe eines elektrischen Heizstabes erwärmt, kann man erkennen, dass die zugeführte Wärme(menge) Q direkt proportional der Masse und der Temperatursteigerung ΔT ist: $Q \sim m \cdot \Delta T$

Wird das Experiment z. B. mit Quecksilber durchgeführt, benötigt man weniger Wärmeenergie. Die zugeführte Wärme hängt also auch vom Material ab. Die Materialkonstante nennt man **spezifische Wärmekapazität *c***.

- Die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist mit 4 180 J/kgK besonders hoch. Aus diesem Grund ist Wasser als Kühlmittel gut geeignet.
- Die Formel $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ ist nur für einen Temperaturbereich ΔT anwendbar, in dem der Aggregatzustand gleich bleibt.

Merk & Würdig

Wärmemenge *Q*

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

m … Masse, *[m] = kg*

c … spez. Wärmekapazität, *[c] = J/kgK*

ΔT … Temperaturdifferenz, *[ΔT] = K*

Beispiel 2.16

a) Welche Energiemenge ist notwendig, um 1 Liter Wasser um 1° C zu erwärmen?

b) Um welche Höhendifferenz h könnte eine 1-kg-Masse mit der unter **a)** ermittelten Energiemenge gehoben werden?[1)]

c) Auf welche Geschwindigkeit v könnte eine 1-kg-Masse mit der unter **a)** ermittelten Energiemenge gebracht werden?[1)]

a) Mit der Gleichung $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ lässt sich die gesuchte Wärmeenergie berechnen. Beachte, dass $V = 1\,l \Rightarrow m = 1$ kg gilt:

$Q = 1\text{ kg} \cdot 4\,187\text{ J/kgK} \cdot 1\text{ K} = \mathbf{4\,187\text{ J}}$

Man benötigt etwa 4 190 J.

b) Mit der potenziellen Energie $E = m \cdot g \cdot h$ lässt sich diese Höhe berechnen:

$$h = \frac{E}{m \cdot g} = \frac{4187\text{ J/kgK}}{1\text{ kg} \cdot 9{,}81\text{ m/s}^2} = 426{,}8\text{ m}$$

Man könnte die 1-kg-Masse um **fast 430 m** heben.

c) Mit der kinetischen Energie $E = \frac{m \cdot v^2}{2}$ lässt sich die Endgeschwindigkeit berechnen:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4\,187\text{ J/kg/K}}{1\text{ kg}}} = \mathbf{91{,}51\text{ m/s}}$$

Die Masse könnte mit der unter **a)** ermittelten Energiemenge auf **fast 330 km/h** beschleunigt werden.

Bemerkung 1: Die Temperaturdifferenz 1° C = 1 K darf den Aggregatzustand der Masse (hier Wasser) nicht verändern.

Bemerkung 2: 1 kcal = 4 187 J; die veraltete Einheit für die Wärme(menge) ist gerade so definiert, dass sie 1 kg Wasser von 14,5° C auf 15,5° C (also um $\Delta\vartheta$ = 1° C) erwärmt.

Bemerkung 3: Es bedarf also einer gewaltigen Energiemenge, um Wasser zu erwärmen.

[1)] Mehr über den Begriff der Energie erfährst du im Kapitel 5.

Beispiel 2.17

Man schütte zu 15 dag Wasser mit einer Temperatur von 17 °C 45 dag Wasser mit einer Temperatur von 50 °C. Welche Mischtemperatur ϑ_m stellt sich ein?

Die Wärmemenge, die das warme Wasser abgibt, wird vom kalten Wasser aufgenommen (Verluste werden vernachlässigt). Also:

$m_1 \cdot c_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_m)$

Index 1 … kaltes Wasser

Index 2 … warmes Wasser

Umstellen auf ϑ_m ergibt

$$\vartheta_m = \frac{m_1 \cdot \vartheta_1 + m_2 \cdot \vartheta_2}{m_1 + m_2} = \frac{15\text{ dag} \cdot 17\text{ °C} + 45\text{ dag} \cdot 50\text{ °C}}{15\text{ dag} + 50\text{ dag}} = \mathbf{38{,}538\text{ °C}}$$

Die Temperatur stellt sich auf **39 °C** ein.

Übungen

Ü 2.32 Für ein Vollbad werden 220 Liter Wasser von 10 °C auf 37 °C aufgewärmt. Welche Energie ist dazu notwendig?

Ü 2.33 Herr Saubermann will ein Vollbad mit 36 °C nehmen. Dazu lässt er in die Badewanne – sie fasst 250 Liter Wasser – Wasser aus der Wasserleitung (20 °C) und aus dem Warmwasserspeicher (60 °C) ein. Wie viel kaltes bzw. warmes Wasser muss zufließen?

2.3.3 Thermische Ausdehnung *(thermal expansion)*

Es ist eine bekannte Tatsache, dass sich Körper unter Wärmeeinfluss ausdehnen.

Temperatur ϑ

Temperatur $\vartheta + \Delta\vartheta$

l_0 Δl

Abb. 57.2 *Die Länge l_0 bei ϑ °C dehnt sich um Δl bei $(\vartheta + \Delta\vartheta)$ °C*

Der Körper habe die Länge l_0 bei einer Temperatur ϑ. Ändert sich die Temperatur um $\Delta\vartheta$, dann ist die Längenänderung Δl direkt proportional zur Temperaturänderung und zur Ausgangslänge:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta\vartheta$$

Für die erreichte Endlänge l gilt: $l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$

Die Proportionalitätskonstante α ist vom Material abhängig und heißt **linearer Ausdehnungskoeffizient**.

Bei Temperaturerniedrigung wird $\Delta\vartheta$ negativ.

Werte für den thermischen Ausdehnungskoeffizent in $\frac{1}{K}$	
Aluminium	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$
Kupfer	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$
Stahl	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$
Beton	$0{,}7 \cdot 10^{-5}$ bis $1{,}3 \cdot 10^{-5}$
Glas	$0{,}9 \cdot 10^{-5}$
Quarzglas	$0{,}05 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 57.1

Abb. 57.1 *„… mit Hilfe von Apparaten, welche sich eines Hebels bedienen, die den Zweck haben, eine durch Wärme verursachte Ausdehnung fester Körper, die sehr gering ist, dem Auge zu vergrößern." anno 1850*

Merk & Würdig

Thermische Längenänderung

$\boldsymbol{\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta\vartheta}$

$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$

l_0 … Ausgangslänge, $[l_0] = m$

$\Delta\vartheta$ … Temperaturdifferenz, $[\Delta\vartheta] = $ °C

Δl … Längenänderung, $[\Delta l] = m$

α … linearer Ausdehnungskoeffizient, $[\alpha] = 1/°C$

l … Endlänge, $[l] = m$

Beispiel 2.18

Laut Reiseführer verändert sich die Höhe des Eiffelturms (330 m) im Sommer um 15 cm. Kann diese Aussage stimmen? Welcher Temperaturdifferenz wäre das Pariser Wahrzeichen dabei ausgeliefert? ($\alpha = 1{,}1 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$)

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$\Delta\vartheta = \left(\frac{l}{l_0} - 1\right) \cdot \frac{1}{\alpha} = \left(\frac{330{,}15\ \mathrm{m}}{330\ \mathrm{m}} - 1\right) \cdot \frac{1}{1{,}1 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}} = \mathbf{41\ K}$$

Die Angabe im Reiseführer kann durchaus stimmen; die errechnete Temperaturdifferenz von 41 K = 41 °C ist realistisch. Der Eiffelturm wird regelmäßig sehr genau vermessen. Es konnte festgestellt werden, dass die Spitze an sonnigen (windstillen) Tagen etwas Richtung Norden abweicht. Auf der Sonnenseite werden die Stahlträger offenbar heißer; diese Seite des Turmes dehnt sich stärker aus.

Übungen

Ü 2.34 Fernwärmeleitung: Eine 1 500 m lange Fernwärmeleitung, über die bei einem Kraftwerk Wärme für Heizzwecke ausgekoppelt wird, soll mit einer Dampftemperatur von 380 °C betrieben werden. Berechne die Längenausdehnung. (Material Stahl, Ausgangstemperatur 20 °C)

Ü 2.35 Welchen Längenausdehnungskoeffizient hat eine Glassorte, die sich bei Erwärmung um 65 K um 4 ‰ ausdehnt?

Abb. 58.1 *Stöße übertragen die Energie von der Zone höherer zu der Zone niedriger Temperatur.*

2.3.4 Wärmeleitung *(heat conduction)*

Wann immer eine Temperaturdifferenz besteht, fließt Wärme(energie). Sie fließt einmal langsam (durch die Isolation eines Kühlschranks) oder schnell (beim Kochen). Der Transport von Wärme ist allgegenwärtig: die wärmenden Strahlen der Sonne, der warme Pullover im Winter, die Thermoskanne, die Zentralheizung …

An den Berührungsflächen der Körper stoßen die rasch bewegten Teilchen des heißen Körpers gegen die langsameren des kalten Körpers. Die dabei zwischen den Teilchen übertragene Energie heißt **Wärme *Q*** (*heat*) (siehe Kapitel 2.3.2). Der heiße Körper gibt die Energie $\Delta E = Q$ ab, die der kalte Körper aufnimmt.

Unter einem **Energietransport durch Wärme** (*heat transfer*) versteht man den Übergang von Energie zwischen zwei Körpern auf Grund der ungeordneten Molekularbewegung (thermische Bewegung) oder durch Wärmestrahlung.

Fließt Wärme durch einen Körper, so spricht man von **Wärmeleitung** (*heat conduction*). Die Wärme, die durch einen Körper mit dem Querschnitt A und der Dicke d fließt, ist proportional zur Temperaturdifferenz ΔT zwischen seinen Enden. Die übertragene Wärmemenge Q ist auch von einer Materialkonstanten, der **Wärmeleitfähigkeit λ**, abhängig.

Für die Wärmemenge Q gilt:

Abb. 58.2 *Das Diagramm veranschaulicht die Wärmeleitung durch eine Wand. Das Diagramm im unteren Teil der Abbildung zeigt die Temperaturabnahme zwischen Innen- und Außenseite.*

Merk & Würdig

$$Q = \lambda \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$$

Q … übertragene Wärmemenge, $[Q] = J$

λ … Wärmeleitfähigkeit, $[\lambda] = W/mK$

A … Querschnitt, $[A] = m^2$

d … Wanddicke, $[d] = m$

Δt … Zeitspanne, $[\Delta t] = s$

ΔT … Temperaturdifferenz, $[\Delta T] = K$

Es ist bei dieser Gleichung zu beachten, dass sie nur dann Gültigkeit hat, wenn die Temperaturdifferenz konstant bleibt.

Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK			
Silber	420	Wasser	0,56
Kupfer	380	Holz	0,1
Eisen	40	Kork	0,04
Glas	0,84	Gänsedaunen	0,25
Beton	0,84	Luft	0,23
Ziegel	0,7	Vakuum	0

Tabelle 59.1

Beispiel 2.19

Große Mengen an Wärme gehen bei Häusern durch die Fenster verloren. Welche Wärmemenge ist dies durch ein Fenster (2 m · 1,5 m) in einer Stunde? Die weiteren Daten entnehme man der **Abb. 59.1** und **Tabelle 59.1**.

Die Fläche beträgt $A = 3\ m^2$, $d = 3{,}2 \cdot 10^{-3}$ m und laut **Tabelle 59.1** ist $\lambda = 0{,}84$ W/mK.

Wir setzen diese Werte in $Q = \lambda \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$ ein mit $\Delta t = 1$ s und erhalten die Wärmemenge, die in einer Sekunde durch das Fenster „verschwindet“:

$$Q = 0{,}84\ \text{W/mK} \cdot \frac{3\ \text{m}^2}{3{,}2 \cdot 10^{-3}\ m} \cdot 1s \cdot 30\,K = \mathbf{23\,625\ J}$$

Fast 24 kJ/s gehen an einem typischen Wintertag an Wärme durch das Fenster verloren.

Das entspricht einer Wärmemenge von **85 MJ in einer Stunde**. Dafür benötigt man etwa 2 m³ Erdgas als Energieträger. Der Verlust an Wärme wird durch starken Wind noch größer. Er weht die erwärmte Luft an der Fensteraußenseite weg und bringt kalte Luft nach.

Abb. 59.1

Beispiel 2.20

Laura schwimmt in einem See und produziert durch ihre Muskelbewegung 260 J Wärme in einer Sekunde. Im Körperinneren darf es aber zu keiner Temperaturerhöhung über 37° C kommen. Folglich muss die Wärme nach außen abgeführt werden. Wie kalt muss der See sein, dass diese Wärme abgeführt werden kann?

Körperoberfläche $A = 1{,}6\ m^2$; Wärmeleitfähigkeit von Fett $\lambda = 0{,}2$ W/mK; Dicke der „Fettschicht“ $d = 2{,}5$ cm

Setzt man die gegebenen Zahlenwerte in die umgeformte Gleichung $Q = \lambda \frac{A}{d} \cdot \Delta t \cdot \Delta T$ ein so, erhält man:

$$\Delta T = T_i - T_a = \frac{Q \cdot d}{\lambda \cdot A} \Rightarrow T_a = 310\ \text{K} - \frac{0{,}025\ \text{m} \cdot 260\ \text{W}}{0{,}2\ \text{W/mK} \cdot 1{,}6\ \text{m}^2} = \mathbf{290\ K}$$

Das Wasser müsste **17° C** haben.

Laura würde unter diesen vereinfachten Bedingungen an einem Hitzestau leiden. Tatsächlich spielt die Wärmeleitung nur eine untergeordnete Rolle. Hauptsächlich erfolgt die Kühlung der inneren Organe über den Wärmetransport des Blutkreislaufs. Blut nimmt im Körperinneren Wärme auf, transportiert sie in kühlere Regionen. Eine große Hautoberfläche (Stichwort: große Ohren der Elefanten) unterstützt diesen Effekt.

Übungen

Ü 2.36 Es ist bekannt, dass in Bergwerken pro 100 m Tiefe die Temperatur um 3 K steigt. Die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins betrage 2 W/mK. Wie viel W/m² fließen zur Oberfläche?

Ü 2.37 Ein Brett aus Kork leitet $3{,}6 \cdot 10^5$ J pro Tag durch 1 m², wenn sich die Temperatur jeden cm um 1 K ändert. Wie viel Joule werden pro Tag durch ein Korkbrett mit 0,75 m · 1,8 m Grundfläche und 4 cm Dicke transportiert, falls sich die eine Fläche auf 0° C und die andere auf 18° C befindet?

Ü 2.38 Welche Wärmemenge geht täglich durch eine 24 m² große, beiderseits verputzte Ziegelwand von 43 cm Dicke verloren, wenn die Wandtemperatur innen 20° C und außen –5° C beträgt?

3 Einteilung und Übersicht der Mechanik

In diesem Kapitel geht es um

- Translation
- Rotation
- Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Diagramme

Die **Mechanik** ist das älteste Teilgebiet der Physik. Mit ihr hat man sich bereits in der Antike beschäftigt. So war die Beobachtung des Laufs der Sonne am Himmel für die Ägypter von entscheidender Bedeutung, um die jährliche Nilüberschwemmung vorherzusagen. Bei den Griechen versuchte ARISTOTELES die Bewegung eines Körpers zu beschreiben.

Die Beschreibung der Bewegungen von Gegenständen auf der Erde und die von Himmelskörpern wurden bis NEWTON klar auseinander gehalten. Erst NEWTON erkannte, dass alle Körper – irdische wie himmlische – mit denselben Gesetzen beschrieben werden können.

Dies war gleichbedeutend mit der Geburtsstunde der Mechanik. Nun konnte allmählich auch das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen gesetzmäßig erfasst werden.

Mechanik der						
Flüssigkeiten			Festkörper		Gase	
Hydrostatik	Hydrodynamik	Kinematik	Dynamik	Statik	Aerostatik	Aerodynamik
		Translation Rotation				

Die tatsächliche Bewegung eines Körpers erfolgt im dreidimensionalen Raum. Eine exakte Beschreibung einer derartigen Bewegung ist aufwändig und oft gar nicht notwendig. Wir vereinfachen daher Bewegungen so, dass sie (mit Ausnahme der Rotation) immer entlang einer Geraden erfolgen; wir betreiben also in diesem Kapitel die so genannte **Kinematik in einer Dimension**[1)] (*one-dimensional kinematics*).

3.1 Die Arten der Bewegungen *(types of motion)*

Fast alle Phänome, mit denen sich die Physik beschäftigt, haben etwas mit Bewegung zu tun: Atome, Licht, Schall, Zahnräder, der Mond, Meteore, Galaxien … Es ist daher notwendig, einen kleinen Überblick über die Arten der Bewegung zu geben – siehe Seite 62.

3.2 Der Massenpunkt *(mass point)*

Wenn wir komplizierte Bewegungen des Alltags beschreiben wollen, sind Vereinfachungen nötig, um Ergebnisse zu erhalten. Entscheidend ist, dass diese Näherungen richtige und brauchbare Ergebnisse liefern. Wir können zur vereinfachten Beschreibung der Bewegung eines Körpers seine Gestalt auf einen Punkt (einen **Massenpunkt**) reduzieren. Das ist fast immer sein **Schwerpunkt**. (*An ideal particle is regarded as a massive, pointlike object of no discernable size or internal structure. It occupies only a single point in space.*) Wir reduzieren dabei nicht nur die Gestalt der Körper auf den (gedachten) Massenpunkt, sondern wir beschreiben auch die teilweise sehr komplizierten Bahnformen eines ausgedehnten Körpers durch die einfachere Bewegung des Massenpunkts.

Abb. 61.1 *Schleuderspur eines Autos und die Bewegung seines Schwerpunkts. Beachte, welche Bahn er beschreibt. Benütze zur Überprüfung ein Lineal!*

Abb. 61.2 *Der Schwerpunkt von Athleten in Sprungbewerben (Weit-, Hochsprung) beschreibt eine Parabel. Die Bewegung der Arme und Beine beeinflusst diese Bahn nicht.*

Abb. 61.3 *Ein Feuerwerkskörper wird nach oben geschossen und explodiert. Trotzdem bewegt sich der Schwerpunkt (des Systems) gemäß dem 1. Newton' schen Axiom weiter, obwohl die einzelnen Teile des Feuerwerkskörpers auseinander fliegen.*

[1)] Die Bahnen rotierender Massenpunkte sind natürlich zweidimensional.

Man unterscheidet zwei Arten von Bewegungen:

Translation *translational motion*	**Rotation** *rotational motion*
Alle Punkte bewegen sich auf kongruenten Bahnen.	Alle Punkte bewegen sich auf konzentrischen Kreisen.
Abb. 62.1	**Abb. 62.2**
Die Orientierung des Körpers ändert sich nicht.	Die Orientierung ändert sich.
Abb. 62.3	**Abb. 62.4**
Die Bahnen der Punkte eines Körpers sind gleich lang.	Die Länge der Bahn hängt vom Abstand von der Drehachse ab.
Abb. 62.5	**Abb. 62.6**
Beispiele: • Kabinen des Riesenrads • Seilbahngondel • Personen auf einer Rolltreppe	**Beispiele:** • Kurve fahrendes Fahrzeug • Zeiger einer Uhr • alle Räder von Kraftfahrzeugen

3.3 Die gleichförmige Bewegung *(uniform motion)*

Definition: Die Bewegung eines Körpers ist genau dann gleichförmig, wenn er in gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt.

Der Quotient

„Zurückgelegte Wegdifferenz Δs durch die dazu benötigte Zeitdifferenz Δt“[1)]

wird als Geschwindigkeit v definiert.

Die Gleichförmigkeit kann kürzer als „$v = \text{const}$“ geschrieben werden.

Merk & Würdig

Geschwindigkeit *v*

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Gleichförmige Bewegung

$$s = v \cdot t$$

v … Geschwindigkeit, *[v] = m/s*
s … Weg, *[s] = m*
t … Zeit, *[t] = s*

Abb. 63.1 *Das Auto legt in gleichen Zeiten gleiche Wege zurück.*

Beispiel 3.1

Bei einem Autorennen fährt ein Rennfahrer mit einer Geschwindigkeit von 60 m/s in die Zielgerade ein.
Die letzten 300 m seiner Fahrt vor dem Ziel sind grafisch darzustellen.

Wir tragen den Ort des Autos in ein s-t-Diagramm ein.
Die in gleichen Zeitintervallen $\Delta t = 1$ s zurückgelegten Wegstrecken Δs sind gleich lang (vgl. die kongruenten Dreiecke im s-t-Diagramm).

Abb. 63.2 *Grafische Darstellung der Bewegung eines Rennautos, das mit konstanter Geschwindigkeit (v = 60 m/s) die letzten 300 m auf der Zielgeraden zurücklegt.*

[1)] Der griechische Buchstabe Δ (groß Delta) wird üblicherweise für Differenzen benützt.

Merk & Würdig

1 m/s = 3,6 km/h

Die SI-Einheit der Geschwindigkeit ist zwar 1 m/s, doch im täglichen Gebrauch („Umgangssprache“) benützt man Kilometer pro Stunde (km/h) als Geschwindigkeitseinheit[1].

Wie man leicht zeigen kann, gilt die Umrechnung

- 1 m/s = 3,6 km/h,
- 1 km/h = 1000 m/3600 s = 1/3,6 m/s = 0,28 m/s

Diagramme

Um eine Bewegung anschaulich darzustellen, kann man entweder eine Folge von Bildern nebeneinander legen **(Abb. 64.1)** oder in einem so genannten **s-t-Diagramm** **Abb. 64.2** verdeutlichen. Dabei wird der zurückgelegte Weg in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Abb. 64.1

Abb. 64.2 *s-t-Diagramm*

Abb. 64.3 *s-t-Diagramm*

Abb. 64.4 *v-t-Diagramm*

Was sagt ein s-t-Diagramm aus?

1) Wir erkennen in **Abb. 64.2**, dass das s-t-Diagramm (*position-time-graph*) einer geradlinigen **gleichförmigen Bewegung** eine **Gerade** ergibt. Man spricht von einem linearen Zusammenhang zwischen Weg und Zeit. Diese Gerade entspricht nicht der Bahnform des Körpers! D.h. der Körper muss sich nicht auf einer geradlinigen Bahn bewegen.
2) Die Steigung (*slope*) der Geraden spiegelt die Geschwindigkeit wieder. Je schneller – umso steiler **(Abb. 64.2)**.
3) Wir können ablesen, wie lange der Fahrer für die Strecke benötigt oder welche Strecke er in einer bestimmten Zeit zurücklegt.
4) Die in gleichen Zeitintervallen zurückgelegten Strecken sind bei einer gleichförmigen Bewegung gleich lang.
5) Wir können erkennen, in welche Richtung der Körper unterwegs ist **(Abb. 64.3)**.

v-t-Diagramm:

Im v-t-Diagramm **(Abb. 64.4)** ergibt sich der zurückgelegte Weg rechnerisch als Flächeninhalt unterhalb der v-Kurve, hier eine Gerade parallel zur Zeitachse. Diese Tatsache gilt allgemein und wird im Kapitel 3.4 verwendet.

[1] Man vermeide unter allen Umständen die Bezeichnung „kmh“ oder „Stundenkilometer“!

Beispiel 3.2

Wegen der übersichtlichen Darstellung von Bewegungen wurden vor dem Digitalzeitalter s-t-Diagramme auch von den ÖBB verwendet, und zwar in Form von **grafischen Fahrplänen**.

Abb. 65.1 *Ausschnitt aus einem grafischen Fahrplan zwischen Wien Westbahnhof und Rekawinkel, beginnend um 12:00 Uhr.*

In welche Richtung fährt der Zug 561? Mit welcher Durchschnittsgeschwindigkeit fährt er zwischen Rekawinkel und Wien Westbahnhof?

Wir lesen ab: Rekawinkel ist 24,6 km von Wien entfernt; Zug 561 ist um 12:02 in Rekawinkel und kommt um 12:26 in Wien an.

Fahrstrecke $s = 24{,}6$ km

Fahrzeit t von 12:02 bis 12:26 = 24 min $= \frac{24}{60} = 0{,}4$ h

Seine Durchschnittsgeschwindigkeit ist daher $v = \frac{s}{t} = \frac{24{,}6 \text{ km}}{0{,}4 \text{ h}} = \mathbf{61{,}5 \text{ km/h}}$

Weitere wichtige Merkmale der gleichförmigen Bewegung:

- Die **Beschleunigung** (siehe Kapitel 3.4) einer gleichförmigen Bewegung ist null **(Abb. 65.2)**.

Abb. 65.2

Abb. 65.3 *Bei der Geschwindigkeit kommt es auch auf die Orientierung an!*

Die Geschwindigkeit ist eine vektorielle Größe $\vec{v}$. Es ist also damit möglich und sinnvoll die Bewegungsrichtung eines Gegenstands anzugeben.

- Eine Bewegung wird immer dann als gleichförmig angesehen, wenn dies hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Z. B. wird die Beschleunigungs- und Bremszeit eines Zuges nach und vor Stationen nicht immer berücksichtigt; die Bewegung der Erde um die Sonne wird als gleichförmig angenommen; man verwendet die mittlere Geschwindigkeit.

  Daher: Wegen der einfacheren Rechnung nimmt man vernachlässigbare Fehler in Kauf (siehe Kapitel 1.6).

- **Mittlere Geschwindigkeit** (*average speed*) siehe Beispiel 3.3 $\bar{v} = \frac{\tilde{s}}{\tilde{t}}$

  Die mittlere Geschwindigkeit berücksichtigt den Fall, dass ein Körper nicht während der gesamten Fahrstrecke mit konstanter Geschwindigkeit unterwegs ist.

Abb. 66.1 *„The speed is right but the velocity is wrong." (mph = miles per hour)*

In der englischen Sprache wird unterschieden:
Geschwindigkeit als Betrag (*speed*) und Geschwindigkeit als Vektor (*velocity*).

Beispiel 3.3

Ein Körper bewegt sich 20 m weit mit 6 m/s, 40 m mit 5 m/s und 10 m mit 10 m/s. Wie groß ist $\bar{v}$?

$\Delta s = 70$ m

$$\Delta t = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} + \frac{s_3}{v_3}$$

$$\Delta t = \frac{24\ \text{m}}{6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} + \frac{40\ \text{m}}{5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} + \frac{10\ \text{m}}{10\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 13\ \text{s}$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{74\ \text{m}}{13\ \text{s}} = \mathbf{5{,}69\ m/s}$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Körpers beträgt $\mathbf{\bar{v} = 5{,}7\ m/s}$.

- **Momentangeschwindigkeit** (*instantaneous velocity*)

  Um die augenblickliche Geschwindigkeit zu bestimmen, muss Δt möglichst klein sein. Je kleiner man Δt wählt, umso eher entspricht die Größe der Momentangeschwindigkeit.

  Der mathematische Hintergrund ist anspruchsvoll (Differentialrechnung).

Beispiele von Geschwindigkeiten in m/s	*v* in m/s		*v* in m/s
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$3 \cdot 10^8$	Reizleitung in Nervenfasern	10^2
Lichtgeschwindigkeit in Glas	$2 \cdot 10^8$	Geschwindigkeit eines Mofas	10
Geschwindigkeit der Erde um die Sonne	$3 \cdot 10^4$	Gehgeschwindigkeit	1
Fluchtgeschwindigkeit eines Satelliten	10^4	Fallgeschwindigkeit einer Schneeflocke	10^{-1}
Geschwindigkeit des Mondes um die Erde	10^3	Geschwindigkeit einer Weinbergschnecke	10^{-3}
Schallgeschwindigkeit in Luft	$3 \cdot 10^2$	Geschwindigkeit des Elektronenstroms in Metallleitern	10^{-4}
Spitzengeschwindigkeit im Autorennsport	10^2	Wachstumsgeschwindigkeit eines menschlichen Haares	$3 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 66.1 *Beispiele von Geschwindigkeiten*

Beispiel 3.4

Zwei Sportler A und B wollen entscheiden, wer von ihnen der schnellere ist. A läuft 60 m in 10 s, B 100 m in 15 s. Wer ist schneller?

Man setzt die gegebenen Werte in die bekannte Gleichung ein.

A: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{60\ \text{m}}{10\ \text{s}} = \mathbf{6\ m/s}$

B: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{100\ \text{m}}{15\ \text{s}} = \mathbf{6{,}7\ m/s}$ **B ist schneller.**

Beispiel 3.5

Bei Unfällen ist immer wieder vom Sekundenschlaf als Ursache die Rede. Welchen Weg legt ein Autofahrer während einer Sekunde bei 100 km/h zurück?

$v = 100\ \text{km/h} = \dfrac{100}{3{,}6}\ \text{m/s}$

$t = 1\ \text{s}$

$s = v \cdot t \Rightarrow s = \dfrac{100\ \text{m}}{3{,}6\ \text{s}} \cdot 1\ \text{s} = \mathbf{27{,}77\ m}$ **s = 28 m**

Beispiel 3.6

Wie schnell ist **a)** die Erde näherungsweise auf ihrem Weg um die Sonne, **b)** wie schnell der Mond um die Erde? Beide Geschwindigkeiten sind in m/s und in km/h anzugeben.

a) $r = 150$ Millionen km $= 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m

$t = 1\ \text{a} = 365\ \text{d} = 365 \cdot 86\,400\ \text{s}$

$v = \dfrac{\Delta s}{\Delta t} = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot r}{t} \Rightarrow v = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{m}}{(365 \cdot 86\,400)\ \text{s}} = 29\,900\ \text{m/s}$

$v = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 10^{8}\ \text{km}}{365 \cdot 24\ \text{h}} = 107\,600\ \text{km/h}$

$v = 30\,000\ \text{m/s} = \mathbf{108\,000\ km/h}$

b) $r = 384\,000\ \text{km} = 3{,}84 \cdot 10^{8}\ \text{m}$

$t = 1\ \text{Monat} = 30\ \text{d} = 30 \cdot 86\,400\ \text{s}$

$v = \dfrac{\Delta s}{\Delta t} = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot r}{t} \Rightarrow v = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot 3{,}84 \cdot 10^{8}\ \text{m}}{(30 \cdot 86\,400)\ \text{s}} = 930\ \text{m/s}$

$v = 930\ \text{m/s} = \mathbf{3\,350\ km/h}$

Abb. 67.1

Beispiel 3.7

Eine Radfahrerin fährt eine Strecke von 60 km mit einer mittleren Geschwindigkeit von 30 km/h. Bei der Rückfahrt ist sie bereits müde und erreicht nur eine mittlere Geschwindigkeit von 20 km/h.
Wie groß ist ihre mittlere Geschwindigkeit für die gesamte Strecke?
Zeichne von dieser Bewegung das s-t- und das v-t-Diagramm.

$v_1 = 30\ \text{km/h}$ $s_1 = s_2 = s = 60\ \text{km}$

$v_2 = -20\ \text{km/h}$

$\Delta s = 120\ \text{km}$

$t_{ges} = \dfrac{s_1}{|v_1|} + \dfrac{s_2}{|v_2|} = s\left(\dfrac{1}{|v_1|} + \dfrac{1}{|v_2|}\right) \Rightarrow$

$t_{ges} = \left(\dfrac{1}{30\ \text{km/h}} + \dfrac{1}{20\ \text{km/h}}\right) = 5\ \text{h}$

$v = \dfrac{\Delta s}{\Delta t} = \dfrac{120\ \text{km}}{5\ \text{h}} = 24\ \text{km/h}$

$\mathbf{v = 24\ km/h = 6{,}7\ m/s}$

Weg s in km; 0, 20, 40, 60, 80; A, B; Zeit t in h; 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6

Geschwindigkeit v in km/h; 0, 10, 20, 30, 40; Zeit t in h; 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6

Abb. 67.2

Beispiel 3.8

Der Weltrekord im 100-Meter-Lauf der Damen wurde 1988 von Florence Griffith-Joyner (1959 – 1998) aufgestellt. Sie lief die 100 m in 10,49 s. Welcher Durchschnittsgeschwindigkeit in m/s und km/h entspricht dies? Warum berechnet man hier „nur" die Durchschnittsgeschwindigkeit?

Man setzt $\Delta s = 100$ m und $\Delta t = 10{,}49$ s in die Gleichung $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ ein.

Also $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{100 \text{ m}}{10{,}49 \text{ s}} = \mathbf{9{,}53\ m/s}$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt **9,53 m/s = 34,3 km/h.**

Die Läuferin läuft nicht die gesamte Strecke mit dieser Geschwindigkeit. Sie startet aus dem Stillstand, und gegen Ende der Laufstrecke könnte sie auch langsamer werden.

Abb. 68.1

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Fähigkeiten im Rechnen mit Geschwindigkeiten und Arbeiten mit Diagrammen.

Ü 3.1 Renate legt mit dem Rad die 18 km zu ihrer Freundin in 1 Stunde und 15 Minuten zurück. Mit welcher Geschwindigkeit fährt sie?

Ü 3.2 Man weiß, dass der Mond durchschnittlich 384 000 km von der Erde entfernt ist. Die NASA hat während ihres Apollo-Programms einen Spiegel auf dem Mond platziert. Man schickt einen Laserstrahl auf diesen Spiegel. Wie lange dauert es, bis der Laserstrahl wieder auf der Erde empfangen wird?

Ü 3.3 Wie groß ist die Geschwindigkeit der Erde an einem Punkt am Äquator durch die Rotation um die Erdachse?

Radius der Erde $r = 6380$ km

Ü 3.4 Welche Strecke legt die Erde an einem Tag bei ihrer Bewegung um die Sonne zurück?

Abstand Erde – Sonne: $r = 150$ Millionen Kilometer

Ü 3.5 Am 5. September 1977 starteten die USA die Raumsonde Voyager 1. Sie hat seither etwa 21 574 000 000 km zurückgelegt. Welcher mittleren Geschwindigkeit entspricht dies?

Wo befindet sich derzeit die Sonde? Informiere dich!

Ü 3.6 Der Weltrekord im Laufen stand 1990 für die 100 m Sprintdistanz auf 9,92 s, der für 1500 m auf 3 min 29,46 s. Für die Marathondistanz (42,195 m) gibt es keinen offiziellen Weltrekord; eine schnelle Laufzeit beträgt etwa 2 Stunden 10 Minuten. Berechne die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Läufer auf diesen Distanzen in m/s und in km/h.

Ü 3.7 Zwei Pkw, 200 km voneinander entfernt, bewegen sich mit 40 km/h bzw. 60 km/h aufeinander zu.

a) Wo und wann treffen sie einander?

b) Das zugehörige s-t-Diagramm ist zu zeichnen.

Ü 3.8 Beschreibe in Abb. 68.4 möglichst genau die Geschwindigkeiten der Körper 1 bis 5. Was kann man über den Beginn der jeweiligen Bewegung in Bezug auf Zeit und Ort aussagen?

Ü 3.9 Ein Pkw kommt von einer Landstraße ($v = 100$ km/h) in ein Ortsgebiet (50 km/h), muss vor einer Ampel warten, fährt weiter und beschleunigt nach der Ortstafel wieder auf der Landstraße auf 100 km/h.

Zeichne von dieser Bewegung den prinzipiellen Verlauf der Kurven im s-t- und v-t-Diagramm. (Die Beschleunigungsphasen sind nicht zu berücksichtigen.)

Abb. 68.2 *zu Ü 3.2*

Abb. 68.3 *zu Ü 3.5*

Abb. 68.4 *zu Ü 3.8*

Übungen

Ü 3.10 Welche Strecke hat die Dame seit Beginn der Fahrt zurückgelegt **(Abb. 69.1)**?

Ü 3.11 Auszug aus den Schwimm-Wettkampfbestimmungen:

„§ 101 Wettkampfbahn Länge: 50 m …

Maßtoleranzen: Gegenüber der nominalen Länge von 50,00 m ist nur eine Abweichung von plus 0,03 m zulässig …"

Der aktuelle Weltrekord aus dem Jahre 2001 über 1500 m Freistil der Männer beträgt 14:34,56 s.

a) Wie viele Längen müssen geschwommen werden?

b) Wie groß ist die Durchschnittsgeschwindigkeit?

c) Wie lange braucht ein Schwimmer für einen Meter?

d) Der Schwimmbewerb wird auf einer um die Toleranz längeren Bahn ausgetragen. Welche Länge hat der Athlet zusätzlich zu schwimmen, und wie lange braucht er – bei gleichem v wie in **b)** – dazu?

Ü 3.12 Ein Gepard verfolgt eine Gazelle. Zu Beginn der Verfolgung hat die Gazelle einen Vorsprung von 180 m und läuft mit 54 km/h dem Gepard davon, der sie mit 72 km/h verfolgt. Wie lange und wie weit muss der Gepard laufen, bis er die Gazelle eingeholt hat?

Abb. 69.1 *„Wie soll ich 90 Kilometer in der Stunde gefahren sein, wenn ich erst seit 10 Minuten unterwegs bin?!"*

Abb. 69.3 zu Ü 3.12 *Geparde erreichen kurzzeitig eine Geschwindigkeit von 100 km/h*

Abb. 69.2 *Die schnellsten menschlichen Schwimmer erreichen 8 km/h – ein Seglerfisch 110 km/h.*

Ü 3.13 Zwei Freunde – Gerhard und Klaus – wollen die Gesetze der gleichförmigen Bewegung überprüfen und beschließen, eine Strecke von 20 km unter folgenden Bedingungen zu durchfahren:

Gerhard fährt mit seinem Rad zuerst 10 km mit 15 km/h, dreht um und fährt wieder mit 15 km/h zurück. Klaus fährt mit 10 km/h bis zum Umkehrpunkt und dann mit 20 km/h zurück.

a) Wer ist schneller und um wie viel?

b) Wie schnell muss der langsamere zurückfahren, um zur gleichen Zeit wie sein Freund am Ziel anzukommen?

c) Das s-t-Diagramm ist zu zeichnen.

Ü 3.14 In **Abb. 69.4** siehst du das s-t-Diagramm eines Körpers. Die Geschwindigkeit des Körpers ändert sich im Laufe der ersten 8 s. Mit welchen Geschwindigkeiten bewegt sich der Körper, über welche Strecke und über welchen Zeitraum? Welche Gesamtstrecke legt er zurück?

Abb. 69.4 *zu Ü 3.14*

Ü 3.15 Zeitungsmeldung vom 31. Jänner 2011:

Michael Grabner ist der schnellste NHL-Profi

Der 23-jährige Kärntner im Dress der New York Islanders gewann die „Super Skills Competition" im Rahmen des All-Star-Spiels

„… Michael Grabner benötigte für eine Runde auf der Eisfläche lediglich 14,2 Sekunden."

Berechne seine mittlere Geschwindigkeit.

Maße des NHL-Spielfeldes: Länge l = 60,96 m; Breite b = 25,61 m; Krümmungsradius der Ecken r = 8 m.

Hinweis: Mache eine Skizze und zeichne die Radien ein, dann kannst du den Umfang bestimmen.

Abb. 69.5 *zu Ü 3.15*

Übungen

Ü 3.16 Um die Geschwindigkeit von Autofahrern zu kontrollieren, wurde im Herbst 2003 erstmals die Methode *Section Control* eingesetzt. Man bestimmt nicht die momentane Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, sondern kontrolliert, ob auf der 2 290 m langen Messstrecke die Fahrzeit bei der erlaubten Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h überschritten wird.

a) Wie groß ist die erlaubte Fahrzeit?

b) Ein Lenker will die Kontrolle überlisten und fährt die erste Teilstrecke mit 100 km/h, um dann die restlichen 200 m entsprechend langsamer zu fahren. Welche Geschwindigkeit muss er einhalten, um unterhalb der tolerierten Zeit zu bleiben?

Neue Radar-Messung
„Section Control"
Messstrecke
Ein- und Ausfahrtszeit werden durch Sensoren gemessen
Kamera mit Infrarotlicht nimmt die **Nummerntafel** auf
Daten (Ein- und Ausfahrtszeit, Aufnahme der Nummerntafel) werden im **Zentalcomputer** gesammelt und ausgewertet
W XYZ1
Anzeige
Wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten, werden die Daten an das Innenministerium übermittelt. Ansonsten werden die Kennzeichen-Aufnahmen automatisch gelöscht.

Abb. 70.1

Alkaid 101, Mizar 81, Alioth 81, Megrez 81, Dubhe 124, Merak 79, Phekda 84

Abb. 70.2 *The Great Plough, distances in lightyears.*

Ü 3.17 *The Major Plough, the third largest constellation, is definitely the best known one.* ***Fig. 70.2*** *shows the distances of all stars of this constellation. Calculate the distances in km!*

What happened within your family, respectively in the city during the running time of light? Ask your parents or grandparents!

Ü 3.18 *A cyclist is moving at a speed of 12 m/s for one minute and at a speed of 16 m/s for two minutes. Find the average speed.*

Ü 3.19 *„Serenely in space, this delicate shell is reminiscent of the „soap bubble" planetary nebula. However, its calm is only illusory because the shell is lit up by a blast wave that is smashing into the interstellar medium more than 5 000 km/s. The bubble, called SNR0509, is the remnant of a stellar explosion that should have been visible in the Large Magellanic Cluod – only 160 000 light-years away – to observers in the southern hemisphere around 1600 AD."*

How large is the planetary nebula?

Abb. 70.3 *The image is a composite of visible light (red shell) and X-rays (blue-green glow) from the Hubble and Chandra Space Telescopes, respectively.*

Übungen

Ü 3.20 Zugvögel legen oft gewaltige Strecken zwischen ihren Brutplätzen und den Winterquartieren zurück. Ihre Fluggeschwindigkeit beträgt selten mehr als 40 km/h. Berechne die durchschnittliche Flugdauer der 6 Vögel in **Abb. 71.1**.

Hinweis: Bestimme die Flugstrecke mit Hilfe eines Atlas (oder per Internet).

Abb. 71.1 *Flugrouten „unserer" Zugvögel*

Merk & Würdig

Beschleunigung *a*

Die Veränderung einer Geschwindigkeit Δv pro Zeiteinheit nennt man Beschleunigung.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = const$$

Gesetze für die Beschleunigung aus der Ruhelage

$$a = \frac{v}{t} = const$$

$$s = \frac{v \cdot t}{2}$$

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$$

$$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$$

a … Beschleunigung, $[a] = m/s^2$

v … Geschwindigkeit, $[v] = m/s$

s … Weg, $[s] = m$

t … Zeit, $[t] = s$

3.4 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

(uniformly accelerated motion)

Im Kapitel 3.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass ein Körper selten bzw. nur näherungsweise seine Geschwindigkeit konstant hält. Wir betrachten also jetzt den Fall, dass seine Geschwindigkeit nicht konstant ist.

Wir beschränken uns allerdings auf den Fall, dass sich die Geschwindigkeit gleichmäßig ändert und definieren:

Ein Körper bewegt sich genau dann **gleichmäßig beschleunigt**, wenn er seine Geschwindigkeit pro Zeitintervall Δt um den gleichen Betrag Δv ändert.

Abb. 72.1 *Orts-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Funktion für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.*

Abb. 72.2 *v-t-Diagramm*

Abb. 72.3 *Die Steigung der Tangente zeigt die momentane Geschwindigkeit an.*

Aus dem v-t-Diagramm kann der zurückgelegte Weg bestimmt werden. Für jedes Zeitintervall Δt ist Δv gleich groß. Das v-t-Diagramm ist daher eine Gerade **(Abb. 72.2)**. Der zurückgelegte Weg beträgt $s = \frac{v \cdot t}{2}$

Setzt man diesen Weg s in die Gleichung $v = a \cdot t$ ein, so erhält man den in der Zeit t zurückgelegten Weg s: $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$

Formt man die beiden Gleichungen $v = at$ und $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ geeignet um, so erhält man die so genannte **zeitfreie Gleichung**: $v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$

Mit der Gleichung $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ lässt sich jetzt auch das s-t-Diagramm zeichnen. In **Abb. 72.1** sind alle Diagramme zusammengefasst.

Die Momentangeschwindigkeit eines gleichmäßig beschleunigten Körpers ändert sich ständig. Dies lässt sich im v-t-Diagramm ablesen. Zur Berechnung von Bewegungen, bei denen z. B. der Luftwiderstand berücksichtigt wird/werden muss, sind Methoden der Mathematik notwendig, die im III. Jahrgang erklärt werden.

Experiment

Im Sportunterricht kannst du mit deinen Kameraden leicht ein s-t-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung aufnehmen. Lege wie in **Abb. 78.1** ein Maßband auf den Boden und platziere die Mitschüler in regelmäßigen Abständen (etwa 90 cm) und lasse sie mit Stoppuhren die Durchgangszeit bestimmen. Die gelaufene Strecke und die zugehörigen Zeiten trägst du in ein Diagramm ein.

Welche Form erwartest du?

Abb. 73.1

Merk & Würdig

- Alle Gleichungen von Seite 72 gelten unter der Voraussetzung, dass der Körper aus der Ruhelage heraus beschleunigt oder bis zum Stillstand abgebremst wird.
- Wird die Geschwindigkeit größer, so spricht man von Beschleunigung: $a > 0$
  Wird die Geschwindigkeit kleiner, so spricht man von Verzögerung: $a < 0$
- Unter Geschwindigkeitsänderung (= Beschleunigung) versteht man entweder eine Änderung des Betrages der Geschwindigkeit oder eine Änderung der Richtung der Bewegung oder eine Änderung von beiden Größen. Die Beschleunigung ist also ein Vektor $\vec{a}$.

Änderung der Geschwindigkeit, aber nicht der Richtung.

Abb. 73.2

Änderung der Richtung, aber nicht der Geschwindigkeit.

Abb. 73.3

Änderung der Richtung und der Geschwindigkeit.

Abb. 73.4

Beispiele für Beschleunigungen in m/s²			
Aufprall eines Tennisballes auf eine Mauer	bis 10^5	Fallbeschleunigung auf der Erde	10
Beschleunigung bei Autounfällen	bis 10^3	Bremsverzögerung	bis –8
Fallbeschleunigung auf der Sonne	273	Beschleunigung eines Autos	bis 4
Beschleunigung bei einem Raketenstart	50	Fallbeschleunigung am Mond	1,6
Fallbeschleunigung am Jupiter	26	Beschleunigung einer U-Bahn	1

Tabelle 73.1

Beispiel 3.9

Eine trainierte Radfahrerin startet bei einer Kreuzung bei Grün und erreicht nach 3 s eine Geschwindigkeit von 25 km/h. Laut Pkw-Werbung soll ein Auto in 12, 5 s von 0 auf 100 km/h beschleunigen. Wer beschleunigt besser?

Radfahrerin:

$v = 25\text{ km/h} = \frac{25}{3{,}6}\text{ m/s}$

$a = \frac{v}{t} \Rightarrow \frac{25\text{ m/s}}{3{,}6 \cdot 3\text{ s}} = 2{,}31\text{ m/s}^2$

$\boldsymbol{a = 2{,}3\text{ m/s}^2}$

Pkw:

$v = 100\text{ km/h} = \frac{100}{3{,}6}\text{ m/s}$

$a = \frac{v}{t} \Rightarrow \frac{100\text{ m/s}}{3{,}6 \cdot 12{,}5\text{ s}} = 2{,}2\text{ m/s}^2$

$\boldsymbol{a = 2{,}2\text{ m/s}^2}$

Die Radfahrerin beschleunigt besser.

Oft ist es üblich, für die Erdfallbeschleunigung vereinfacht „1 g" zu sagen; der Mond hat daher $\frac{1}{6}$ g, sagt man.

Beispiel 3.10

Eine Rakete beschleunigt in 4 s auf die Geschwindigkeit von 250 m/s. Welchen Weg legt die Rakete in dieser Zeit zurück und wie groß ist die Beschleunigung?

Wir setzen in die Gleichung $s = \frac{v \cdot t}{2}$ ein und erhalten $s = \frac{250\ \text{m/s} \cdot 4\ \text{s}}{2} = \mathbf{500\ m.}$

Für die Beschleunigung benützen wir $a = \frac{v}{t} = \frac{250\ \text{m}}{4\ \text{s}} = \mathbf{62{,}5\ m/s^2.}$

Die Rakete beschleunigt mit **62,5 m/s²** und legt dabei **500 m** zurück.

Beispiel 3.11

Ein Formel-1-Wagen besitzt nicht nur eine große Beschleunigung, sondern auch seine Verzögerungswerte sind beachtlich. In einer halben Sekunde kann seine Geschwindigkeit von 309 km/h auf 227 km/h reduziert werden.
a) Welcher Verzögerung entspricht dies?
b) Wenn ein „normaler" Pkw diese Verzögerungswerte besäße, wie lange wären Bremsweg und Bremszeit bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h? Die Bremsung erfolgt bis zum Stillstand.

a) Mit der Gleichung $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\frac{227}{3{,}6}\ \text{m/s} - \frac{309}{3{,}6}\ \text{m/s}}{2{,}5\ \text{s}} = \mathbf{-40\ m/s^2}$ erhalten wir die Verzögerung des Boliden.

b) Für den Bremsweg eines Pkw formen wir

$v = \sqrt{2 \cdot |a| \cdot s}$ um: $s = \frac{v^2}{2 \cdot |a|} = \frac{\left(\frac{100}{3{,}6}\ \text{m/s}\right)^2}{2 \cdot 40\ \text{m/s}^2} = \mathbf{9{,}64\ m}$

Die Bremszeit ergibt sich aus $t = \frac{v}{|a|} = \frac{\frac{100}{3{,}6}\ \text{m/s}}{40\ \text{m/s}^2} = \mathbf{0{,}69\ s}$

Der Pkw braucht **0,7 s**, um nach **knapp 10 m** zum Stillstand zu kommen.
Der Bolide bremst innerhalb von **10 m** mit **–40 m/s²** ab.

Beispiel 3.12

Gute Läufer legen 100 m in 10 s zurück. Welche Beschleunigung ist dabei notwendig und welche maximale Geschwindigkeit erreicht ein Läufer, wenn er seinen Lauf zunächst auf einer Strecke von 6 m gleichmäßig beschleunigt und dann den Rest der Strecke mit der erreichten Geschwindigkeit durchs Ziel läuft?

Die Strecke von 100 m zerfällt in 2 Stücke.
$s_1 = 6$ m … gleichmäßig beschleunigte Bewegung
$s_2 = 94$ m … gleichförmige Bewegung

Für s_1 gilt: $s_1 = \frac{v \cdot t_1}{2} \Rightarrow t_1 = \frac{2 \cdot s_1}{v}$

für s_2 gilt: $s_2 = v \cdot t_2 \Rightarrow t_2 = \frac{s_2}{v}$

Da $t = t_1 + t_2 = \frac{2 \cdot s_1}{v} + \frac{s_2}{v} = 10$ s, kann man sich durch Einsetzen von s_1 und s_2 die Geschwindigkeit berechnen:

$\frac{2 \cdot 6\ \text{m}}{v} + \frac{94\ \text{m}}{v} = 10\ \text{s} \Rightarrow \mathbf{v = 10{,}6\ m/s}$

Aus $v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} \Rightarrow a = \frac{v^2}{2 \cdot s} = \frac{(10{,}6\ \text{m/s})^2}{2 \cdot 6\ \text{m}} \Rightarrow \mathbf{a = 9{,}4\ m/s^2}$

Beispiel 3.13

A car accelerates from 13 m/s to 25 m/s **a)** *in 10 s* **b)** *in a distance of 100 m. What was its acceleration? How far did it travel in this time? Assume constant acceleration.*

$\Delta v = 13\ \text{m/s}$

a) $t = 10\ \text{s}$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow a = \frac{13\ \text{m/s}}{10\ \text{s}} = 1{,}3\ \text{m/s}^2 \Rightarrow \boldsymbol{a = 1{,}3\ \text{m/s}^2}$$

b) $s = 100\ \text{m}$

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot s} = \frac{(25\ \text{m/s})^2 - (12\ \text{m/s})^2}{2 \cdot 100\ \text{m}} = 2{,}405\ \text{m/s}^2 \Rightarrow \boldsymbol{a = 2{,}4\ \text{m/s}^2}$$

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, dann zeigst du deine Fähigkeiten im Bestimmen von Beschleunigungen.

Ü 3.21 Eine Auto beschleunigt von 0 auf 100 km/h (gleichmäßig) in 15 s. Berechne

a) die mittlere Beschleunigung,

b) den zurückgelegten Weg.

Ü 3.22 Berechne die mittlere Beschleunigung eines Düsenjets beim Start. Takeoff-Geschwindigkeit: 360 km/h, Länge der Startbahn: 2,1 km

Ü 3.23 Ein Fahrer fährt im Stadtgebiet mit der erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h und kann vor einem auftauchenden Passant gerade noch anhalten. Wäre er mit erhöhter Geschwindigkeit ($v = 70$ km/h) gefahren, hätte er das Hindernis überrollt. Mit welcher Geschwindigkeit wäre dies geschehen?

Ü 3.24 Das Flughafenlöschfahrzeug FLF12.000 **(Abb. 75.3)** 4 × 4 erreicht trotz seiner 32 t Gesamtgewicht in 29 s eine Geschwindigkeit von 80 km/h. Wie groß ist die Beschleunigung?

Abb. 75.1 *zu Ü 3.22*

Abb. 75.2 *zu Ü 3.23*

Abb. 75.3 *FLF12.000*

Übungen

Ü 3.25 Krista sieht begeistert bei Schirennen zu. Am Bildschirm sieht sie die Zwischenzeit eingeblendet. Eine Läuferin erreicht während der ersten 10 Fahrsekunden eine Geschwindigkeit von 122 km/h. Wie groß ist die Beschleunigung und welchen Weg hat die Läuferin dabei zurückgelegt?

Ü 3.26 Zeitungsmeldung vom 29. April 2008: Welcher Beschleunigung war der Fahrer ausgesetzt? Ist diese Meldung glaubwürdig? Wie lang ist der Bremsweg?

Nach Spanien-Schrecksekunde unverletzt

100 Millisekunden retteten Heikki Kovalainen das Leben

Als er unter dem Reifenstapel steckte, in den er mit über 200 km/h eingeschlagen war, war Heikki Kovalainen kurz bewusstlos. Beim F1-Rennen in der Türkei soll der Finne wieder starten. Sein Leben haben lediglich 100 Millisekunden gerettet. Diese Zeit lag zwischen dem Einschlag und dem Stillstand des Autos.

Abb. 76.1 *zu Ü 3.26*

Ü 3.27 In welcher kürzesten Zeit kann ein Körper eine 2 km lange Strecke zurücklegen, wenn seine Beschleunigung niemals größer als 20 m/s² sein darf, und er zu Beginn und am Ende der Bewegung die Geschwindigkeit null haben soll?

Ü 3.28 Ein Schnellzug fährt 120 km/h. Er wird durch eine Schnellbremsung gleichmäßig verzögert und kommt nach 500 m zum Stillstand. Berechne die Bremsverzögerung und die Dauer des Bremsvorganges.

Ü 3.29 Mit welcher Geschwindigkeit wird ein kleines Insekt gemäß der Zeitungsnotiz **(Abb. 76.2)** in die Fangblase des Wasserschlauches gesogen?

Ü 3.30 Die Sprungleistung von Zikaden ist gewaltig. Aus dem Stand können sie beinahe das Zweihundertfache ihrer Körperlänge von 1 cm hüpfen. Um den Katapultmechanismus ihrer Hinterbeine zu analysieren, filmten Biologen die Zikaden mit 30 000 Bildern pro Sekunde. Dabei konnten die Biologen feststellen, dass die Tiere innerhalb einer Millisekunde auf fast 20 km/h beschleunigen. Bei Gefahr können daher die Tiere augenblicklich in sichere Entfernung hüpfen.

a) Welcher Beschleunigung entspricht das?

b) Welche Strecke legt das Tier während der Beschleunigungsphase zurück?

BLITZSCHNELLE PFLANZE

Wasserschläuche sind die schnellsten Pflanzen der Welt. Diese fleischfressenden Gewächse saugen ihre Beute in weniger als einer Millisekunde mit einer Fangblase auf. Biologen aus Grenoble und Freiburg haben nun gemessen, dass durch Unterdruck in der Fangblase kleine Insekten mit dem 600-fachen der Erdbeschleunigung in die Falle rauschen.

(Die Zeit, 17. Februar 2011)

Abb. 76.2 *zu Ü 3.29*

Ü 3.31 Eine Straßenbahn fährt von einer Haltestelle mit einer Beschleunigung von 0,3 m/s² weg bis sie ihre Endgeschwindigkeit von 25 km/h erreicht hat. Mit dieser Geschwindigkeit fährt sie 240 m und bremst dann auf einer Strecke von 18 m ab. Berechne

a) Anfahrzeit
b) Anfahrweg
c) Bremsverzögerung
d) Bremszeit
e) Gesamtfahrzeit
f) Gesamtweg

Ü 3.32 *A departing jet airplane has only 500 m of runway, and must reach a speed of 200 km/h in order to take off. What minimum acceleration should it be capable of?*

Ü 3.33 *A runner hopes to complete the 5 000 m run in less than 13 min. After exactly 11 min, there are still 800 m to go. The runner must then accelerate at 0,2 m/s². How long does he have to accelerate in order to achieve the desired time?*

Ü 3.34 Welche der folgenden Formeln kommen vom Standpunkt der Einheit als Bremsweg eines Fahrzeuges in Frage?

a) $s \sim a \cdot v^2$ **b)** $s \sim a \cdot t^2$ **c)** $s \sim \frac{a \cdot t}{v^2}$ **d)** $s \sim \frac{a}{t}$

Übungen

Ü 3.35 Welche der folgenden Behauptungen ist richtig, welche falsch? Kreuze an!

		richtig	falsch
a)	Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Beschleunigung null.		
b)	Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Geschwindigkeit null.		
c)	Die Geschwindigkeit kann auch in dm/Woche angegeben werden.		
d)	Eine Bewegung ist beschleunigt, wenn die Geschwindigkeit zunimmt.		

Ü 3.36 Kreuze die richtige Antwort an:

a) Eine Bewegung ist beschleunigt, wenn
- ☐ sich der Betrag oder die Richtung der Geschwindigkeit ändert,
- ☐ sich weder der Betrag noch die Richtung der Geschwindigkeit ändert,
- ☐ sich die Geschwindigkeit nicht ändert.

b) $s \sim t^2$ bedeutet, dass
- ☐ in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt werden,
- ☐ nach 2 s der doppelte Weg zurückgelegt wurde,
- ☐ nach 2 s der vierfache Weg zurückgelegt wurde.

c) Im v-t-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung gilt:
- ☐ je steiler die Gerade ist, umso größer ist die Beschleunigung,
- ☐ je steiler die Gerade ist, umso kleiner ist die Beschleunigung,
- ☐ je steiler die Gerade ist, umso größer ist die Geschwindigkeit.

d) Die Beschleunigung ist
- ☐ die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit,
- ☐ die Änderung der zurückgelegten Strecke pro Sekunde,
- ☐ – egal welche Bewegung – immer null.

Abb. 77.1

Ü 3.37 Die geradlinigen Bewegungen verschiedener Körper werden durch die nachfolgenden Diagramme wiedergegeben. Beschreibe, um welche Bewegung es sich handelt (gleichförmige oder gleichmäßig beschleunigte Bewegung) und ergänze die fehlenden Diagramme (s-t-, v-t- bzw. a-t-Diagramme).

a)

Abb. 77.2

b)

Abb. 77.3

c)

Abb. 77.4

d)

Abb. 77.5

Ü 3.38 Bringe die folgenden Felder in die richtige Reihenfolge, sodass in jeder Zeile eine richtige physikalische Behauptung entsteht. Du erhältst jeweils ein dreibuchstabiges Lösungswort.

G	s	A	bewegt sich	A	beschreibt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.
E	Eine Gerade im	H	ist die Einheit	R	nicht beschleunigt.
W	Ein 100-m-Läufer	U	ist die Abkürzung	G	wie ein Marathonläufer.
B	Der Schall	X	v-t-Diagramm	T	des Weges.
O	1 m/s²	E	ist doppelt so schnell	M	der Beschleunigung.

3.5 Der freie Fall im Vakuum *(free fall in vacuum)*

Eine besondere Form der gleichmäßig beschleunigten Bewegung stellt der **freie Fall** dar. Dabei wird aus dem Weg s die Fallhöhe h und aus der allgemeinen Beschleunigung a die **Erd(fall)beschleunigung g**. Dieser Bewegungstyp tritt genaugenommen nur bei physikalischen Fallexperimenten im stoffleeren Raum auf. Diese Bedingung kann man im Labor mit einer so genannten Fallröhre, die evakuiert werden kann, erzielen. Eine Bleikugel und eine Vogelfeder werden in der evakuierten Röhre fallen gelassen. Man stellt fest, dass beide Körper gleich schnell fallen. Eine Tatsache, die schon GALILEI vor ca. 400 Jahren erkannt hat. Er hatte dieses Hilfsmittel – die Fallröhre – aber noch nicht zur Verfügung. Um dies trotzdem zu beweisen, half er sich mit einem Gedankenexperiment:

Abb. 78.1 *Historische Darstellung einer Fallröhre. Die Luftpumpe zum Evakuieren der Röhre wurde erst nach GALILEIS Tod erfunden.*

Experiment

Gedankenexperiment

GALILEI nahm an, dass schwere Massen schneller fallen, und argumentierte etwa so:

„Ich nehme an, dass tatsächlich schwere Körper (= Körper mit großer Masse) schneller fallen als leichte Körper. Ich lasse also (in Gedanken) zwei verschieden schwere Ziegelsteine von einem Turm fallen. Auf Grund meiner Voraussetzung trifft der schwerere früher am Boden auf. Nun binde ich die beiden verschieden schweren Ziegelsteine zusammen. Da jetzt ihre Masse noch größer ist, muss er schneller fallen als der schwere. Andererseits bremst der leichte Ziegelstein den schweren Ziegelstein, sodass die beiden zusammengebundenen Ziegelsteine eigentlich langsamer fallen müssten, als nur der schwere allein. Aber mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten kann ein Körper nicht fallen. Ich schließe daraus, dass alle Körper (unabhängig von ihrer Masse) gleich schnell fallen."

Er hat damit die anfängliche Behauptung, verschieden schwere Massen fallen verschieden schnell, widerlegt.

Zwei einzelne Ziegelsteine fallen ...

... genauso schnell wie zwei verbundene Ziegelsteine.

Abb. 78.2

Merk & Würdig

$$h = \frac{g}{2} t^2 \qquad v = g \cdot t \qquad v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \qquad h = \frac{v \cdot t}{2}$$

g = 9,81 m/s² (Erdfallbeschleunigung)

t … Zeit, $[t] = s$

h … Fallhöhe, $[h] = m$

v … Fallgeschwindigkeit (nach der Zeit t), $[v] = m/s$

Ergänzung & Ausblick

- Der Betrag der Fallbeschleunigung ist auf der Erdoberfläche nicht konstant. Er nimmt vom Äquator zu den Polen hin zu:

  Nordpol $g = 9{,}83\ \mathrm{m/s^2}$

  Äquator $g = 9{,}78\ \mathrm{m/s^2}$
- Der Wert für die geographische Breite $\varphi = 45°$ (etwa Wien) beträgt $9{,}80629\ \mathrm{m/s^2}$. Als Näherungswert genügt $9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$, für Überschlagsrechnungen $10\ \mathrm{m/s^2}$.
- Die Fallbeschleunigung wird durch die Anziehungskraft zwischen Erde und Körper verursacht.
- Die Fallbeschleunigung nimmt mit dem Quadrat des Abstandes vom Erdmittelpunkt ab.

  Hinweis: Diese Aussage gilt für eine Erde, die exakt kugelförmig und homogen ist.

IF THERE WERE COMPUTERS IN GALILEO'S TIME

Abb 79.1 *Fallbeschleunigung*

Beispiel 3.14

Eine Base-Jumperin lässt sich fallen und legt die ersten Meter im freien Fall zurück. Der Luftwiderstand wird vernachlässigt.

a) Wie groß ist die Geschwindigkeit nach zwei Sekunden?

b) Welche Strecke hat sie nach zwei Sekunden durchfallen?

c) Welchen Weg legt die Fallschirmspringerin im freien Fall zwischen der dritten und vierten Sekunde zurück?

d) Wie lange braucht sie, um eine Geschwindigkeit von 30 m/s zu erreichen?

a) $t = 2\ \mathrm{s}$

$v = g \cdot t \Rightarrow v = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2} \cdot 2\ \mathrm{s} = 19{,}62\ \mathrm{m/s}$

v = 19,6 m/s

b) $h = \frac{g}{2} \cdot t^2 \Rightarrow h = \frac{9{,}81\ \mathrm{m/s^2}}{2} \cdot (2\ \mathrm{s})^2 = 19{,}62\ \mathrm{m}$

h = 19,6 m

c) $\Delta s = s_4 - s_3 = \frac{g}{2} \cdot (t_4^2 - t_3^2) \Rightarrow \Delta s = \frac{9{,}81\ \mathrm{m/s^2}}{2} \cdot (4^2 - 3^2)\ \mathrm{s^2} = 34{,}33\ \mathrm{m}$

˜s = 34,3 m

d) $v = g \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{g} = \frac{30\ \mathrm{m/s}}{9{,}81\ \mathrm{m/s^2}} = 3{,}058\ \mathrm{s}$

t = 3,1 s

Abb. 79.2 *Die ersten Sekunden nach dem Absprung*

Beispiel 3.15

Laura ist sehr mutig. Sie lässt sich aus 10 m Höhe ins Wasser fallen.

a) Mit welcher Geschwindigkeit taucht sie ins Wasser?

b) Wie lange braucht sie dazu?

c) Das Becken ist 2,5 m tief. Wie stark muss sie verzögern?

a) $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \Rightarrow v = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 \cdot 10\ \text{m}} = 14\ \text{m/s}$ **v = 14 m/s = 50 km/h**

b) $s = \frac{g}{2} \cdot t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{g}} \Rightarrow t = \sqrt{2 \cdot 10\ \text{m}/9{,}81\ \text{m/s}^2} = 1{,}42\ \text{s}$ **t = 1,4 s**

c) $v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} \Rightarrow a = \frac{v^2}{2 \cdot s} \Rightarrow a = (14\ \text{m/s})^2/(2 \cdot 2{,}5\ \text{m/s}^2) = 39{,}2\ \text{m/s}^2$ **$a = -39\ \text{m/s}^2$** Hinweis: Das Vorzeichen ist negativ, da Verzögerung

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, dann zeigst du deine Fähigkeiten rund um den freien Fall.

Ü 3.39 Von der Spitze des Empire State Buildings (Höhe 380 m) fällt ein Gegenstand auf die Straße. Wie lange braucht der Gegenstand für den Fall und mit welcher Geschwindigkeit trifft er auf der Straße auf?

Ü 3.40 Wanderfalken lassen sich vor dem Greifen einer Beute frei herabstürzen und erreichen bis zu 130 km/h. Von welcher Höhe muss sich der Falke mindestens fallen lassen, um diese Geschwindigkeit zu erreichen?

Ü 3.41 Ein Brunnen ist 60 m tief. Nach welcher Zeit hört man den Aufprall eines losgelassenen Steins (Schallgeschwindigkeit v = 340 m/s)? Wie groß ist der Fehler, wenn man die Laufzeit des Schalls vernachlässigt?

Ü 3.42 Ein Mann hat einen freien Fall aus 60 m Höhe überlebt. Seine „Bremszeit" beim Aufprall betrug 0,15 s. Welche (negative) Beschleunigung hat der Mann beim Aufprall erfahren?

Ü 3.43 In Bremen wurde ein 146 m hoher „Fallturm" gebaut **(Abb. 80.1)**, in dem Experimente im freien Fall durchgeführt werden.
Die evakuierte Fallröhre ist 110 m hoch und hat am unteren Ende eine 11 m lange Abbremskammer. Welche (gleichmäßige) Verzögerung tritt in der Abbremskammer auf und nach welcher Zeit landet der Körper am Ende der Abbremsstrecke?

Ü 3.44 Aus einem Bericht über Experimente im Fallturm von Bremen: Beim Auftreffen am Boden taucht die Kapsel mit einer Geschwindigkeit von etwa 170 km/h in einem mit Polystyrolkügelchen gefüllten Behälter ein und wird dabei mit bis zu 50-facher Erdbeschleunigung abgebremst.
Welchen Bremsweg hat die Kapsel in den Polystyrolkügelchen? Vergleiche den berechneten Bremsweg mit dessen Angabe von **Ü 3.43**.

Ü 3.45 Kann ein vom Baum fallender Apfel mit 8 m/s ins Gras fallen? Wenn ja, wie hoch hing er?

Ü 3.46 Astronauten landen auf einem fernen Planeten. Um dessen Fallbeschleunigung zu bestimmen, lassen sie einen Stein aus 2 m Höhe fallen und beobachten eine Fallzeit von 0,5 s.
Welche Fallbeschleunigung herrscht auf diesem Planeten?

Ü 3.47 *A body falls freely from rest to the ground a certain distance h below. In the last second of its flight it falls a distance of* $\frac{h}{2}$. *Calculate the size of h.*

Abb. 80.1 *zu Ü 3.43 und 3.44*

Experiment

Wir basteln uns ein Reaktionszeitlineal.

Du hältst ein Lineal (Geodreieck funktioniert nicht sehr gut) so in der Hand, dass deine Freundin bzw. dein Freund das Lineal genau bei 0 cm zwischen Daumen und Zeigefinger hat, ohne das Lineal zu berühren **(Abb. 81.1)**. Du lässt das Lineal zu einem beliebigen Zeitpunkt fallen, und dein Freund versucht das Lineal zu erwischen. Aus der Fallstrecke kannst du die Reaktionszeit berechnen.

Schüler/in	Fallstrecke in cm	berechnete Reaktionszeit

Abb. 81.1

3.6 Die Rotation *(rotation)*

Die Richtung der Körperachse bleibt gleich.

Die Richtung der Körperachse wird gedreht.

Abb. 81.2

Drehachse

Abb. 81.3

Die Unterscheidung zwischen Translation und Rotation ist bereits bekannt. Wie bei der Translation lassen sich auch für drehende Körper Bewegungsgesetze aufstellen. Nun ist es aber nicht mehr möglich, den Körper auf einen Massenpunkt zu reduzieren. Wenn wir den Körper als Gesamtheit betrachten, sprechen wir von einem **starren Körper** (*rigid body*). Wir beobachten nun, wie er sich um eine **feste Drehachse** (*axis of rotation*) dreht. Die Punkte auf der Drehachse bleiben während der Drehung in Ruhe. Alle Punkte des starren Körpers, die nicht auf der Drehachse liegen, bewegen sich auf Kreisbahnen um die Drehachse. Will man diese Bewegung beschreiben, so erkennt man, dass der Drehwinkel für alle Punkte gleich ist. Dies führt zur Definition des **Drehwinkels** φ (*angle*) im so genannten **Bogenmaß (Abb. 81.3)**.

Die folgende Tabelle stellt Winkel im Gradmaß und im Bogenmaß gegenüber:

Gradmaß	360°	180°	90°	≈ 57°	1°
Bogenmaß	2π	π	π/2	1	π/180°

Für die Angabe eines Winkels im Bogenmaß hat man die Einheit Radiant (abgek. rad) gewählt. Man schreibt: *[φ] = rad*.

Merk & Würdig

Drehwinkel

$$\varphi = \frac{b}{r}$$

φ … Drehwinkel, *[φ] = 1 = rad*

b … Kreisbogen, *[b] = m*

r … Radius, *[r] = m*

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, zeigst du deine Fähigkeiten im Bestimmen von Größen der Rotation.

Ü 3.48 Der Radfahrer in **Abb. 82.1** tritt in die Pedale.
Welche Bahn beschreiben die Pedale **a)** bezüglich des Rades, **b)** bezüglich der Rennbahn?
Wie sieht die Bahn der Pedale aus, wenn der Radfahrer nicht in die Pedale tritt?

Ü 3.49 Welche der folgenden Aussagen gelten für eine Rotation?

a) Die Punkte eines rotierenden Körpers beschreiben Kreisbahnen.

b) Alle Punkte des rotierenden Körpers sind gleich schnell.

c) Eine Drehbewegung wird durch den Radius r und den Drehwinkel φ beschrieben.

d) Die Bahnen der Punkte eines rotierenden Körpers sind verschieden lang.

e) Bei jeder Drehung eins Körpers bleibt die Lage der Rotationsachse im Raum unverändert.

Abb. 82.1 *zu Ü 3.48*

Ein Winkel kann im Gradmaß oder ...

... im Bogenmaß angegeben werden.

φ in rad

φ in °

$r = 1$

Abb. 82.2

3.6.1 Die gleichförmige Rotation *(uniform rotation)*

Bleibt bei der Drehung der Betrag der Geschwindigkeit jedes Punktes gleich, so sprechen wir von einer **gleichförmigen Rotation**. Die Änderung des Drehwinkels wird durch eine neue Größe beschrieben – die **Winkelgeschwindigkeit** ω (*angular velocity*).

Sie ist – in Analogie zur Translation – wie folgt definiert:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist also ein Maß für die „Schnelligkeit" einer Drehbewegung.

Für die gleichförmige Drehung gilt: $\omega = const.$

Im Alltag gibt man statt der Winkelgeschwindigkeit häufig die Zahl der Umdrehungen pro Minute an. Man nennt diese Größe **Drehzahl** (*number of revolutions*) $\boldsymbol{n}$.

Gibt man die Anzahl der Umdrehungen oder periodischen Vorgänge pro Sekunde an, so spricht man von der **Frequenz** (*frequency*) $\boldsymbol{f}$.

Der Kehrwert der Frequenz gibt an, wie lange eine Umdrehung oder ein periodischer Vorgang dauert. Diese Zeit nennt man **Periodendauer** (*oscillation period*) $\boldsymbol{T}$.

Für manche Anwendungen (z. B. Schwingungen) ist es wichtig, einen Zusammenhang zwischen ω und f anzugeben. Er lautet

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\cdot\pi}{T} = 2\cdot\pi\cdot f$ und wird **Kreisfrequenz** (*angular frequence*) genannt.

Merk & Würdig

Gleichförmige Rotation $\omega = const$

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ $f = \frac{1}{T}$ $f = \frac{n}{60}$

φ … Drehwinkel, $[\varphi] = rad$

r … Radius der Drehbewegung, $[r] = m$

T … Periodendauer, $[T] = s$

f … Frequenz, $[f] = Hz$

ω … Winkelgeschwindigkeit, $[\omega] = 1/s$

n … Drehzahl, $[n] = min^{-1} = rpm$

Kreisfrequenz

$\omega = 2\cdot\pi\cdot f = 2\cdot\pi\cdot\frac{n}{60}$

ω … Kreisfrequenz, $[\omega] = s^{-1}$

f … Frequenz, $[f] = Hz$

n … Drehzahl, $[n] = min^{-1} = rpm$

Beispiel 3.16

Die Gleichungen der Rotation und der Translation sind ähnlich.
Probleme lassen sich daher auch analog lösen.

Angabe für Translation

Ein Pkw legt in 15 s 90 m zurück. $v = ?$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{90\ \text{m}}{15\ \text{s}} = 6\ \text{m/s}$$

v = 6 m/s

Angabe für Rotation

Ein Rotor überstreicht in 15 s 90 rad. $\omega = ?$

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{90\ \text{rad}}{15\ \text{s}} = 6\ \text{s}^{-1}$$

˝ = 6 s^{-1}

Beispiel 3.17

Der Sekundenzeiger einer Uhr ist 15 mm, der Minutenzeiger 14 mm und der Stundenzeiger 12 mm lang. Berechne die Längen der Kreisbögen, die die Zeigerspitzen bei einer halben Umdrehung zurücklegen.

Aus der Definition des Drehwinkels $\varphi = \frac{b}{r}$ berechnen wir die gesuchte Größe $b = r \cdot \varphi$ und setzen die gegebenen Größen ein.

$\varphi = \pi$ für alle drei Zeiger

Sekundenzeiger: $b = 15\ \text{mm} \cdot \pi = 47{,}12\ \text{mm}$ **b = 47,1 mm**
Minutenzeiger: $b = 14\ \text{mm} \cdot \pi = 43{,}98\ \text{mm}$ **b = 44,0 mm**
Stundenzeiger: $b = 12\ \text{mm} \cdot \pi = 37{,}699\ \text{mm}$ **b = 37,7 mm**

Beispiel 3.18

Eine Wäscheschleuder rotiert mit 1400 U/min. Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit? Wie lange dauert eine Umdrehung?

$$n = 1440\ \text{U/min} \Rightarrow f = \frac{n}{60} = 24\ \text{Hz}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 24\ \text{Hz} = 150{,}79\ \text{Hz}$$

˝ = 150,8 s^{-1}

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{24\ \text{Hz}} = 4{,}16 \cdot 10^{-2}\ \text{s}$$

T = 0,04 s

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, zeigst du deine Fähigkeiten im Bestimmen von Rotationsgrößen.

Ü 3.50 Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit des Stunden-, Minuten- und Sekundenzeigers?

Ü 3.51 Berechne die Winkelgeschwindigkeit der Erde um die Sonne. ($r_{\text{Erdbahn}} = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m)

Ü 3.52 Der Neutronenstern ($d = 20$ km) im Krebsnebel rotiert 30-mal pro Sekunde. Wie groß ist seine Winkelgeschwindigkeit?

Ü 3.53 Ein Rad macht bei gleichförmiger Drehung 50 Umdrehungen in 10 s. Wie groß ist **a)** die Drehzahl **b)** die Frequenz **c)** die Periodendauer **d)** die Winkelgeschwindigkeit? **e)** Welchen Drehwinkel legt das Rad in 2,6 s zurück?

Ü 3.54 Ein Rad rotiert mit n Umdrehungen in einer Minute. Die Drehzahl wird verdoppelt. Wie ändern sich T, ω, f und r? Bleiben sie gleich, halbieren oder verdoppeln sie sich?

Abb. 83.1

Merk & Würdig

Winkelbeschleunigung

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

α … Winkelbeschleunigung, $[\alpha] = 1/s^2 = s^{-2}$

ω … Winkelgeschwindigkeit, $[\omega] = 1/s = s^{-1}$

t … Zeit, $[t] = s$

3.6.2 Die gleichmäßig beschleunigte Rotation

(uniformly accelerated rotation)

Wird die Rotation schneller oder langsamer, so ändert sich die Winkelgeschwindigkeit. Dieser Vorgang wird durch den Begriff der **Winkelbeschleunigung** (*angular acceleration*) α beschrieben. Sie gibt die Änderung der Winkelgeschwindigkeit pro Zeitintervall an.

Berücksichtigt man die Analogie zwischen Translation und Rotation, und zwar

Weg $s \Rightarrow$ Winkelweg φ

Geschwindigkeit $v \Rightarrow$ Winkelgeschwindigkeit ω

Beschleunigung $a \Rightarrow$ Winkelbeschleunigung α

so kann man die weiteren Gleichungen für die gleichmäßig beschleunigte Rotation leicht aufstellen:

Merk & Würdig

Gleichmäßig beschleunigte Rotation $\alpha = const$

$$\varphi = \frac{\alpha}{2} t^2 \qquad \varphi = \frac{\omega t}{2} \qquad \omega = \sqrt{2 \cdot \alpha \cdot \varphi}$$

α … Winkelbeschleunigung, $[\alpha] = 1/s^2$

ω … Winkelgeschwindigkeit, $[\omega] = 1/s$

φ … Winkelweg, Drehwinkel, $[\varphi] = 1$ (= rad)

t … Zeit, $[t] = s$

Beispiel 3.19

Die Gleichungen der Rotation und der Translation sind analog. Probleme lassen sich daher auch analog lösen.

Angabe für Translation

Ein ruhender Körper beschleunigt innerhalb von 2 s auf eine Geschwindigkeit von 4 m/s.
Wie groß ist seine Beschleunigung, und welche Strecke legt er dabei zurück?

$t = 2$ s

$v = 4$ m/s

$$a = \frac{v}{t} = \frac{4\ \text{m/s}}{2\ \text{s}} = \mathbf{2\ m/s^2}$$

$$s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{4\ \text{m/s} \cdot 2\ \text{s}}{2} = \mathbf{4\ m}$$

Angabe für Rotation

Ein ruhender Körper beschleunigt innerhalb von 2 s auf eine Winkelgeschwindigkeit von 4 rad/s = 4 s^{-1}.
Wie groß ist seine Winkelbeschleunigung und welchen Winkel(weg) legt er dabei zurück?

$t = 2$ s

$\omega = 4$ rad/s

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{4\ s^{-1}}{2\ \text{s}} = \mathbf{2/s^2}$$

$$\varphi = \frac{\omega \cdot t}{2} = \frac{4\ s^{-1} \cdot 2\ \text{s}}{2} = \mathbf{4\ rad}$$

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, zeigst du deine Fähigkeiten im Bestimmen von weiteren Rotationsgrößen.

Ü 3.55 Eine Kreissäge beginnt sich zu drehen und erreicht innerhalb von 2 s eine Drehzahl von 5 500 U/min.
Wie groß ist die Winkelbeschleunigung?

Ü 3.56 Aus Sicherheitsgründen müssen die Messer eines Rasenmähers innerhalb einer halben Umdrehung des Messers beim Abschalten zum Stillstand kommen. Welche Winkelverzögerung liegt vor?
Radius der Messer r = 20 cm, Drehzahl n = 200 U/min

Abb. 84.1

3.6.3 Bahngrößen

Auch bei einer Rotation kommen Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vor. Diese **translatorischen Größen** werden auch als **Bahngrößen** bezeichnet. Dazu betrachten wir einen Körper, der sich auf einer Kreisbahn bewegt. Denken wir uns ein kleines Wegstück der Kreisbahn als kurze Strecke, so können wir die momentane Geschwindigkeit des Körpers wie bei der gleichförmigen Bewegung berechnen (für den zurückgelegten Weg Δs wird der Kreisbogen Δb gesetzt).

Abb. 85.1 *Zur Definition eines Winkels*

Merk & Würdig

Momentane Geschwindigkeit des Körpers bei gleichförmiger Bewegung

$\boldsymbol{v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta b}{\Delta t} = r \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = r \cdot \omega}$ mit $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ … Winkelgeschwindigkeit

$\Delta b = r \cdot \Delta\varphi$ (siehe Definition eines Winkels)

v … Bahngeschwindigkeit, $[v] = m/s$

Δb … überstrichener Kreisbogen, $[\Delta b] = m$

Δt … benötigte Zeit, $[\Delta t] = s$

r … Radius, $[r] = m$

Allgemein gilt: Bahngröße = Radius · Drehgröße

Also:

$\boldsymbol{s = r \cdot \varphi}$

$\boldsymbol{v = r \cdot \omega}$

$\boldsymbol{a = r \cdot \alpha}$

Abb. 85.2 *Die Bahngeschwindigkeit wird auch Tangentialgeschwindigkeit genannt.*

Ergänzung & Ausblick

- Die Bahngeschwindigkeit steht immer tangential zur Kreisbahn des Körpers (und normal zum Radius).
- Man bezeichnet die Geschwindigkeit daher oft auch als **Tangentialgeschwindigkeit** (*tangential speed*).
- Die Bahngeschwindigkeit auf dem Umfang eines fahrenden Rads ergibt sich als Überlagerung von Translation und Rotation.

Abb. 85.3

Fahrzeug mit blockierenden Rädern … durchdrehenden Rädern Abrollbewegung (fahrendes Auto)

Beispiel 3.20

Die größten Weiten beim Hammerwerfen liegen bei etwa 82 m.
Diese Weite fliegt der Hammer (r = 1,5 m) in etwa 6 s. Wie oft dreht sich der Hammerwerfer in einer Sekunde, bevor er den Hammer loslässt?

Der Hammer fliegt mit einer Geschwindigkeit von

$$v = \frac{s}{t} = \frac{82\ \text{m}}{6\ \text{s}} = 13{,}7\ \text{m/s}$$

Mit dieser Geschwindigkeit muss der Hammerwerfer den Hammer loslassen.
Damit lässt sich nun mit $v = r \cdot \omega$ die Winkelgeschwindigkeit berechnen:

$$v = r \cdot \omega \Rightarrow \omega = \frac{v}{r} = \frac{13{,}7\ \text{m/s}}{1{,}5\ \text{m}} = 9{,}1\ \text{s}^{-1}$$

Die Periodendauer ergibt aus der Gleichung **˝ = 2 ˙ f** und $\boldsymbol{f = \frac{1}{T}}$ zu $\boldsymbol{T = 0{,}68}$ **s**.

Der Hammerwerfer dreht sich **fast 1,5-mal in der Sekunde.**

Abb. 86.1

Beispiel 3.21

Welche Höchstgeschwindigkeit hat ein Pkw, dessen Motor die maximale Drehzahl n = 3900 U/min aufweist? Der Wagen hat im vierten Gang eine Gesamtuntersetzung von 1 : 3,1. Der äußere Raddurchmesser beträgt 58 cm.

Durch Kombination der Gleichungen $v = r \cdot \omega$, $\omega = 2\pi f$ und $f = \frac{n}{60}$ erhält man die Gleichung

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r \frac{n}{60}\quad v = 2 \cdot \pi \cdot 0{,}29\ \text{m} \cdot \frac{3\,900}{60}\ \text{s}^{-1}$$

Nun müssen wir noch die Gesamtuntersetzung berücksichtigen, so dass wir für die gefahrene Geschwindigkeit des Fahrzeugs

$v_{gefahren} = \frac{v}{3{,}1} = 38{,}2$ m/s = **137,5 km/h** erhalten.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, zeigst du deine Fähigkeiten im Bestimmen von Bahngrößen bei der Rotation :

Ü 3.57 Wie schnell bewegt sich ein Punkt am Äquator?

Ü 3.58 Berechne die Winkelgeschwindigkeit des Autoreifens (r = 35 cm) eines Pkws, der mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h fährt. Wie viele Umdrehungen **a)** pro Sekunde **b)** pro Minute führt der Reifen aus?

Ü 3.59 Lies diese Zeitungsmeldung **(Abb.86.2)** aufmerksam. Wenn man den Radius des Neutronensternes berechnen kann, dann berechne ihn.

50.000 km pro Sekunde

GENF (SN, AFP). Das europäische Weltraum-Observatorium Integral hat den schnellstdrehenden Röntgen-Pulsar entdeckt. Wie die Universität Genf mitteilte, dreht sich der Neutronenstern je Sekunde 600 Mal um sich selbst und entwickelt dabei an seiner Ober˝ äche eine Geschwindigkeit von 50.000 Kilometern in der Sekunde. Der Pulsar ist ein Neutronenstern mit Röntgenstrahlung, der seine Energie aus einem Begleitstern abzieht. Das eigenartige Gespann wird von den Wissenscha° ern mit dem Namen V 0332+53 bezeichnet. Bereits vor zwei Jahrzehnten war dieser Pulsar dem US-Satelliten Exposat aufgefallen. Pulsare entstehen nach einer Supernova, der plötzlichen Helligkeitszunahme eines veränderlichen Sterns.

Abb. 86.2 *zu Ü 3.59*

Ü 3.60 Die Spitze eines Stundenzeigers einer Turmuhr hat die Geschwindigkeit 0,36 mm/s. Wie lang ist der Zeiger?

Ü 3.61 Ein Traktor fährt mit 36 km/h über eine Landstraße. Sein Vorderrad hat einen Durchmesser von 76 cm, sein Hinterrad hat einen Durchmesser von 1,2 m. Wie groß sind die jeweiligen Drehzahlen?

Abb. 86.3 *zu Ü 3.60*

Übungen

Ü 3.62 Herr R. Aser hat sich ein schnittiges Auto gekauft. Damit er seinen Freunden noch mehr imponieren kann, montiert er um 10 cm kleinere Räder. Fährt er jetzt schneller oder langsamer (bei gleicher Drehzahl)? Begründe!

Hinweis: Der Durchmesser ist um 10 cm kleiner.

Ü 3.63 Das Riesenrad in Wien hat einen Durchmesser von 61 m und braucht etwa 20 Minuten für eine Umdrehung. Wie schnell drehen sich die Kabinen durchschnittlich?

Ü 3.64 In erster Näherung beschreibt das Elektron um den Atomkern eine Kreisbahn. Sein Abstand vom Atomkern beträgt $r = 5 \cdot 10^{-9}$ m; seine Geschwindigkeit $v = 2{,}2 \cdot 10^{6}$ m/s. Wie oft „umrundet" das Elektron in einer Sekunde den Atomkern?[1)]

Ü 3.65 Mit welcher Gleichung kann man vom Standpunkt der Einheit die Drehzahl *n* berechnen?

a) $n = \frac{r}{2 \cdot \pi \cdot v}$ **b)** $n = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r}$ **c)** $n = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{r}$ **d)** $n = \frac{2 \cdot \pi}{r \cdot v}$ **e)** $n = \frac{r \cdot v}{2 \cdot \pi}$

Ü 3.66 *A car with tires (r = 25 cm) comes to a standstill from 100 km/h in 50 m without any slipping of the tires. Find:* **a)** *the angular acceleration of the wheels* **b)** *the number of revolutions made while coming to rest.*

[1)] Diese Darstellung des Atoms entspricht nicht (mehr) dem heutigen Wissensstand. Trotzdem ist dieses Modell aus historischen Gründen interessant.

4 Einführung in die Dynamik

In diesem Kapitel geht es um

- Masse
- Dichte
- Kräfte

Im Kapitel Kinematik wurden die Bewegungen eines Körpers durch Angabe von **Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung** beschrieben. Nach der Untersuchung, **wie** sich ein Körper bewegt, soll hier die Frage geklärt werden, **weshalb** er sich bewegt.

Das Kapitel **Dynamik** beschäftigt sich mit der Ursache von Bewegungen. Als zentrale Größe wird dazu die **Kraft** eingeführt. Eine weitere wichtige Größe in der Dynamik ist die **Masse**. Zur Vereinfachung werden Körper durch ihren Schwerpunkt ersetzt. Ihm wird jeweils die Masse des ganzen Körpers zugeschrieben.

Abb. 89.1

4.1 Die Masse *(mass)*

Die **Masse** ist eine Eigenschaft jedes materiellen Körpers. Man erlebt sie im Alltag auf unterschiedliche Art:

- Beim plötzlichen Bremsen wird man in die Sicherheitsgurte gedrückt oder beim Kurvenfahren rutscht man zur Seite: Man spricht von Trägheit des Körpers oder von **träger Masse**.
- Andererseits spürt man seine Masse als Gewicht im Schwerefeld der Erde. Dies wird als **schwere Masse** bezeichnet.

Träge und schwere Masse eines Körpers bekommen die gleiche Einheit und werden zahlenmäßig gleichgesetzt. Wiederholt durchgeführte Experimente haben gezeigt, dass dies zulässig ist. Auf dieser Vereinbarung beruht auch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie.

Die Masse ist eine Grundgröße und die Einheit der Masse daher eine Grundeinheit.

Deÿnition:

Das Kilogramm ist gleich der Masse des internationalen Kilogrammprototyps.

Dieser Prototyp – **das Urkilogramm** – ist ein Platin-Iridium-Zylinder, der in Paris aufbewahrt wird. Ob eine etwa 10 cm große Siliziumkugel das Urkilogramm in naher Zukunft ersetzen wird, ist noch nicht geklärt.

Es gibt mehrere Gründe, warum die Siliziumkugel das Urkilogramm ersetzen soll:

1. Das Kilogramm ist die einzige SI-Grundeinheit, die noch auf makroskopische Größen zurückgeführt wird.
2. Bei der jährlichen Kontrolle des Urkilogramms wurde festgestellt, dass es allmählich leichter wird. Der Grund ist unbekannt.
3. Man will damit auch die so genannte Avogadro-Konstante definieren, die auch für die Chemie von Bedeutung ist.

Bestimmung von Massen

Massen kann man durch Massenvergleich mit einer Balkenwaage **(Abb. 89.3)** bestimmen. Mit Vergleichskörpern aus einem Gewichtssatz **(Abb. 89.4)** wird die Masse eines Körpers bestimmt. Diese Messung heißt Wägung.

Abb. 89.3 *Alte Balkenwaage*

Abb. 89.4 *Gewichtssatz, der eigentlich für die **Massen**bestimmung gedacht ist.*

[1] Die Einheit Karat leitet sich von der Frucht des Johannisbrotbaumes ab. Der Baum heißt auf Griechisch „keration" (Horn). Seine Kerne besitzen immer eine Masse von 0,2 g. Karat darf nur im Edelsteinhandel benutzt werden.

Merk & Würdig

Masse

[m] = 1 kg

Basiseinheit des SI-Systems

1 kg entspricht in anderen Einheiten:
0,001 Tonnen *(ton(t))*
2,2 Pfund *(pound (lb))*
35,3 Unzen *(ounces (oz))*
5000 Karat *(carat)*[1]

Abb. 89.2 *Das „Urkilogramm" ruht unter einer doppelten „Käseglocke" in einem Labor des „Bureau International des Poids et Mesures" in Sèvres bei Paris.*

Beispiele für Massen in kg	
Gesamtmasse des Alls	10^{52}
Sonne	$2 \cdot 10^{30}$
Erde	$6 \cdot 10^{24}$
Mensch	10^{2}
Protein	$2 \cdot 10^{-24}$
Proton	$1{,}67 \cdot 10^{-27}$
Elektron	$9{,}11 \cdot 10^{-31}$

Tabelle 89.1

Masse m (in Kilogramm) und Arbeitsbereiche der Physik

typische Arbeitsbereiche		m (kg)	Beispiele	
			Universum	
Im August 1989 flog Voyager II an Neptun vorüber. Genaue Bahnvermessungen ermöglichten Rückschlüsse auf die Masse des Planeten.	Kosmologie	10^{50}		Kugelsternhaufen M 13
		10^{40}	Milchstraße	
	Astrophysik	10^{30}	Sonne Jupiter Erde Mond	Kugeln Saturnmond Mimas (Durchmesser 300 km)
	Die elektrischen Bindungskräfte ermöglichen eine Vielzahl von Strukturen. Bei Objekten mit zu großer Masse dominiert jedoch die Kugelform.	10^{20}		Saturnkern Marsmond Phobos (Durchmesser 20 km)
		10^{10}	Güterzug Lkw Pkw Mensch	
Quarzwaage - ein kleiner Quarzkristall ändert bei Belastung seine elektrischen Eigenschaften und ermöglicht so die Bestimmung des Gewichtes und der Masse auf der Waagschale.	Technik und Alltag: Mechanik, Hydromechanik, Thermodynamik,	10^{0}	1 l Wasser 1 l Luft	
		10^{-10}	Rotes Blutkörperchen Bakterie	Die regelmäßige Anordnung der Atome in einer Platinspitze wird mit dem Feldionenmikroskop sichtbar gemacht.
		10^{-20}	kleinster Virus Moleküle Atome, Atomkern	
Aus der in Detektoren gemessenen Energie kann auf die Masse kurzlebiger Elementarteilchen geschlossen werden.	Atomphysik Kernphysik Elementarteilchenphysik	10^{-30}	Elektron	

Legende: Alltagserfahrung, Naturbeobachtung

Abb. 90.1

Merk & Würdig

- Im Alltag werden die Begriffe Masse und Gewicht oft verwechselt und nicht unterschieden. Häufig werden sie auch nicht im Sinne ihrer Definition verwendet. Es ist wichtig, sie ganz klar voneinander abzugrenzen (siehe Kapitel 4.5.1).
- Die Masse ist von der Fallbeschleunigung und damit vom Ort **unabhängig**.

4.2 Die Dichte *(density)*

Der Zusammenhang zwischen der Masse eines Körpers und dem Raum, den diese Masse einnimmt, wird durch den Begriff **Dichte** beschrieben (*density – concentration of matter, measured by mass per unit volume*).

Weitere gebräuchliche Einheiten:
g/l (bei Flüssigkeiten) oder *g/cm³*

Umrechnung:
1 g/cm³ = 1000 kg/m³ = 1 t/m³

Merk & Würdig

Dichte

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ … Dichte, $[\rho] = kg/m^3$

m … Masse, $[m] = kg$

V … Volumen, $[V] = m^3$

Ergänzung & Ausblick

- Temperatur und Umgebungsdruck beeinflussen die Ausdehnung der Körper. Die Dichte von Gasen ist besonders stark von Druck- und Temperaturänderungen abhängig. Gase weisen unter Normbedingungen eine um etwa 3 Zehnerpotenzen geringere Dichte im Vergleich zu Flüssigkeiten auf!
- Die Dichte von Wasser ist fast genau 1 000 kg/m³.
- Die Definition $\rho = \frac{m}{V}$ kann auch zur Messung der Dichte über Massen- und Volumsmessung dienen. In der Praxis werden aber oft eigene Messgeräte verwendet, z. B.: Aräometer oder Pyknometer.

Beispiele von Dichten in kg/m³	
Atomkern	10^{18}
Stern	10^3
Gold	$19{,}3 \cdot 10^3$
Blei	$11{,}3 \cdot 10^3$
Kupfer	$8{,}9 \cdot 10^3$
Eisen	$8 \cdot 10^3$
Erde als Planet	$5{,}5 \cdot 10^3$
Aluminium	$2{,}7 \cdot 10^3$
Wasser bei 4°C	10^3
Eis	917
Luft (1 bar)	1,3

Tabelle 91.1

Beispiel 4.1

Ein Stück Messing besteht aus 50 g Kupfer und 30 g Zink. Wie groß ist die Dichte dieser Messinglegierung?
(Die Dichte von Kupfer ist ρ_{Cu} = 8,9 g/cm³, die Dichte von Zink ρ_{Zn} = 7,1g/cm³)

Wir rechnen zuerst die Volumina von Kupfer und Zink aus $V = m/\rho$: V_{Cu} = 5,6 cm³, V_{Zn} = 4,2 cm³.
Daraus ergibt sich das Gesamtvolumen vom Messingstück zu 9,8 cm³; mit der Gesamtmasse von 80 g erhalten wir als Dichte

$$\rho = \frac{80\text{ g}}{9{,}8\text{ cm}^3} = \mathbf{8{,}2 g/cm^3}$$

Die Dichte von Messing beträgt **8 200 kg/m³**.

Übungen

Überprüfe zum Thema Dichte deine Fähigkeiten mit folgenden Übungen:

Ü 4.1 Ein Eiswürfel mit der Masse von 7,76 g hat etwas weniger Dichte als Wasser (ρ_{Eis} = 0,917 kg/dm³). Berechne seine Seitenlänge.

Ü 4.2 Welche Dichte hat Bronze, wenn sie zu 70 % aus Kupfer und zu 30 % aus Zinn besteht? (ρ_{Cu} = 8,9 g/cm³; ρ_{Sn} = 7 300 kg/m³)

Ü 4.3 Ein kugelförmiger Heliumballon hat einen Radius von 2,2 m. Welche Masse hat das Helium darin? (ρ_{He} = 0,18 kg/m³)

Übungen

Ü 4.4 Ein Bandstahl mit rechteckigem Querschnitt (5 mm · 4 cm) hat pro Laufmeter eine Masse von 1,7 kg. Welche Dichte hat diese Stahlsorte?

Ü 4.5 Ein Neutronenstern hat ungefähr die Masse einer Sonne ($2 \cdot 10^{30}$ kg), aber nur einen Durchmesser von etwa 20 km. Berechne seine mittlere Dichte.

Ü 4.6 In einem Einfamilienhaus werden etwa 1 km Kupferdraht (Durchmesser 2 mm) verlegt. Welcher Masse entspricht das?

Ü 4.7 Schätze dein Volumen ab.

Ü 4.8 Derzeit werden jährlich etwa 2 500 t Gold gefördert. Zur Zeit der Römer waren es etwa 8 t im Jahr. Man kann daher gut abschätzen, wie viel Gold bisher gewonnen wurde: 160 000 t.

Wie groß wäre dessen Kantenlänge, wenn die gesamte Goldmenge in einen Würfel gepresst würde?

Zusatzfrage: Schätze vor der Rechnung den Würfel ab. Würde er in deinen Schulhof, auf den Hauptplatz deines Ortes etc. passen?

Ü 4.9 *A water tank measures 2 m · 4 m · 5 m. What mass of water will it contain?*

Experiment

Bestimmung der Dichte von Porzellan

1. Schritt: Bestimmung der Masse mit einer (Feder)waage.

Dazu hängst du die Porzellankanne an der Federwaage auf.

2. Schritt: Bestimmung des Volumens mit Hilfe eines Messbechers.

Dazu füllst du den Messbecher mit ausreichend Wasser und liest den Wasserstand ab. Dann stellst du die Porzellankanne vorsichtig hinein. Wenn die Porzellankanne mit Wasser vollgelaufen ist, liest du den Wasserstand erneut ab. Die Differenz aus dem Wasserstand mit und ohne Porzellankanne im Messbecher ergibt das Volumen der Porzellankanne.

3. Schritt: Bestimmung der Dichte mit Hilfe der Formel $\rho = \frac{m}{V}$.

Dazu setzt du in der Formel die beiden Zahlenwerte für die Masse m in kg und das Volumen V in m^3 ein. Der Quotient ist nun die Dichte ρ in kg/m^3.

Abb. 92.1 *Die Porzellankanne muss …*

Abb. 92.2 *… zur Gänze unter Wasser sein.*

4.3 Der Kraftbegriff *(about forces)*

Die Suche nach der **Ursache von Bewegungen** und nach der Ursache für Verformungen von Körpern führt zum Begriff der Kraft: Eine Kraft versetzt einen ruhenden Gegenstand in Bewegung. Kraft muss man anwenden, um beispielsweise eine rollende Eisenkugel abzustoppen und Kraft ist erforderlich, wenn man einer rollenden Eisenkugel eine Richtungsänderung aufzwingen will. Beschleunigen, Abbremsen, Umlenken sind Beispiele dafür, wie der **Bewegungszustand** von Körpern verändert werden kann.

Im Alltag sind Beispiele für den Einsatz von Kräften leicht zu finden: Muskelkraft, Federkraft, Gewichtskraft, Reibungskraft, magnetische Kraft …

Alltägliche Bewegungsänderungen lassen sich mit Hilfe von Kräften einfach und anschaulich erklären.

Eine Kraft ändert den Bewegungszustand eines Körpers.

Ergänzung & Ausblick

Kurze Geschichte der Kraft

Für ARISTOTELES[1] war klar: Eine Bewegung kann nur dann erfolgen, wenn eine Kraft wirkt; auch dann, wenn sich der Körper gleichförmig bewegt. Für ihn war Kraft die Bewegungsursache, die den Körper ununterbrochen weiter antreibt. ARISTOTELES schrieb: „Alles, was sich bewegt, bewegt sich entweder von Natur oder durch eine äußere Kraft oder vermöge seines freien Willens."

Über viele Jahrhunderte waren Naturwissenschaften und Religion miteinander dicht verwoben. Der Kirchenlehrer THOMAS VON AQUIN[2] übernahm im 13. Jahrhundert die Gedanken des ARISTOTELES. Er verknüpfte die irdischen Kräfte mit den „Kräften des Himmels". Dieses Denken, dass Körper aus sich selbst heraus oder auf Grund „äußerer" (göttlicher) Kräfte bewegt werden, dominierte viele Generationen.

Im 17. Jahrhundert gab es um das „wahre Kraftmaß" eine fachliche Auseinandersetzung. Das Wort „Kraft" wurde hier aber noch nicht in dem heutigen, auf NEWTON zurückgehenden Sinn verwendet. Kraft war einfach eine Bezeichnung für das Treibende in Naturprozessen.

GALILEI versuchte Bewegungen (möglichst) frei von jeder Reibung zu studieren. Seine Theorien beruhten – ganz im Gegensatz zu den Theorien des ARISTOTELES – auf **Experimenten**. Er kam zu folgender Erkenntnis:

„… Dass ohne Reibung und ohne äußere Kraft ein Körper seine geradlinige Bahn beibehält und im Zustand gleichförmiger Bewegung verharrt."

NEWTON nahm diese Idee auf und erkannte, dass eine Kraft notwendig ist, um einen Bewegungszustand zu **verändern**. Zur bloßen Aufrechterhaltung einer Bewegung ist keine Kraft nötig. Erst rund 130 Jahre nach Newtons Tod setzte sich der NEWTON´sche Begriff von Kraft und damit die Unterscheidung von Kraft und Energie durch.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erweiterte EINSTEIN mit der Relativitätstheorie den Begriff der Kraft. Trotzdem war die grundlegende Arbeit NEWTONS, die „Philosophiae naturalis principia mathematica", für die Naturwissenschaften richtungweisend und ist in der klassischen Physik bis heute gültig.

Der Übergang von der aristotelischen Sichtweise der Kraft zu der Newtons ist ein typisches Beispiel eines **Paradigmenwechsels**.

Abb. 93.1 *ARISTOTELES lehrte, dass auch für die Aufrechterhaltung einer gleichförmigen Bewegung Kraft nötig ist.*

Abb. 93.2 *In diesem Werk führte NEWTON die Gesetze der Schwerkraft, die absolute Zeit und die absolute Bewegung ein und legte die Basis zur klassischen Mechanik.*

[1] ARISTOTELES (384 v. Chr. auf Chalkidiki – 322 v. Chr. auf Euböa), griechischer Philosoph in Athen, Lehrer Alexander des Großen. Er war Schüler Platons, von dem er sich durch stärkere Hinwendung zum Erfahrungswissen zunehmend entfernte. Seine Logik, Metaphysik, Physik, Ethik, Politik, Poetik u. a. waren von tiefgreifender Wirkung auf das Abendland.

[2] THOMAS VON AQUIN (1225 bei Aquino – 1274 Fossanova), Kirchenlehrer und Philosoph. Er versuchte, die aristotelische Philosophie der christlichen Glaubenslehre anzupassen.

4.4 Die Newton´schen Axiome *(Newton's laws)*

Newton präzisierte im Werk „Philosophiae naturalis principia mathematica" den Begriff der Kraft durch die Definition von Grundgesetzen, den NEWTON´schen Axiomen.

1. Newton´sches Axiom

Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung.

Abb. 94.1 *„Wenn sich die Erde wirklich dreht, wieso komme ich dann immer auf derselben Stelle auf, wenn ich springe?"*

Experiment

Experiment 1

Abb. 94.2 *Eine Kugel rollt eine schiefe Ebene hinunter auf eine ebene Fläche. Die Kugel wird mit konstanter Geschwindigkeit weiter rollen.*

Experiment 2

Wird das Papierblatt rasch weggezogen, fällt die Münze lotrecht in den Becher.

Wird das Papierblatt rasch weggezogen, bleibt der gefüllte Becher stehen.

Abb. 94.3 *Die Münze verharrt in Ruhe und das Glas bleibt „ruhig" stehen.*

Experiment 3

Bahnkurve vom Wagen aus gesehen

Bahnkurve von der Erde aus gesehen

(a) (b)

Abb. 94.4 *Stehst du auf einem fahrenden Wagen und wirfst einen Ball in die Höhe, so „landet" der Ball wieder in deiner Hand. Auf Grund der Trägheit bewegt sich der Ball so wie der Wagen weiter.*

Experiment 4

Abb. 94.5 *Eine Zwei-Euro-Münze wird auf einen Papierstreifen gestellt.*

Abb. 94.6 *Beim ruckartigen Wegziehen des Streifens bleibt die Münze stehen.*

Folgerungen aus dem 1. Newton'schen Axiom:

1) Dieses Axiom nennt man auch **Trägheitsgesetz**.
2) Jede gleichförmige Bewegung ist frei von Kräften. Daher ist zum Aufrechterhalten einer Bewegung keine Kraft erforderlich.
3) Kraft wird benötigt, um einen Bewegungszustand zu ändern.
4) In einem (vollkommen) gleichförmig sich bewegenden Zug lassen sich Experimente mit dem gleichen Ergebnis durchführen. Es ist uns nicht möglich, durch ein Experiment festzustellen, ob der Zug mit konstanter Geschwindigkeit fährt oder steht. Fährt der Zug jedoch in eine Kurve oder ändert er seine Geschwindigkeit, so bemerken wir das.
5) Die Begriffe „Ruhe" und „Bewegung" sind nur dann sinnvoll, wenn das Bezugssystem angegeben wird.

Bezugssysteme, in denen das Trägheitsgesetz gilt, nennt man **Inertialsysteme**. Beschleunigte Bezugssysteme sind keine Inertialsysteme.

2. Newton´sches Axiom

Kraft ist Masse mal Beschleunigung.

Folgerungen aus dem 2. Newton'schen Axiom:

1) Dieses Axiom nennt man **Grundgleichung der Mechanik**. Das Gesetz ist so fundamental, dass es als **dynamisches Grundgesetz** bezeichnet wird.

2) Wird ein Körper durch eine konstante Kraft bewegt, so erfährt er eine konstante Beschleunigung: $F = \text{const} \Rightarrow a = \text{const}$

3) Je größer die Masse eines Körpers, umso größer muss die beschleunigende Kraft sein.

4) Die Gleichung $F = m \cdot a$ ist die Definition der Kraft. Über dieses Gesetz ist auch die SI-Einheit für die Kraft festgelegt. Zu Ehren von ISAAC NEWTON wird sie „Newton" genannt.

$[F] = [m] \cdot [a] = kg \cdot m/s^2 = N$

Merk & Würdig

Dynamisches Grundgesetz

$F = m \cdot a$

F … beschleunigende Kraft, $[F] = N$

m … Masse, $[m] = kg$

a … Beschleunigung, $[a] = m/s^2$

Experiment

1 kg — 1 N — Beschleunigung 1 m/s²

1 kg — 2 N — Beschleunigung 2 m/s²

1 kg — 3 N — Beschleunigung 3 m/s²

1 kg — 1 N — Beschleunigung 1 m/s²

1 kg 1 kg — 1 N — Beschleunigung 1/2 m/s²

1 kg 1 kg 1 kg — 1 N — Beschleunigung 1/3 m/s²

Abb. 95.1 *Im Experiment erkennt man,*
***1)** dass die Beschleunigung direkt proportional zur Kraft ist: $a \sim F$ und*
***2)** dass die Beschleunigung indirekt proportional zur Masse ist: $a \sim \frac{1}{m}$.*

Beispiele von Kräften in N	
Gravitationskraft Sonne – Erde	$4 \cdot 10^{22}$
Schub einer Saturn V-Rakete	$3 \cdot 10^{7}$
Schub eines Düsenjets	$8 \cdot 10^{5}$
Zugkraft großer Lokomotiven	$5 \cdot 10^{5}$
Hubkraft eines Krans	$4 \cdot 10^{4}$
Bremskraft eines Autos	10^{4}
Wechselwirkung zwischen zwei Protonen	10^{4}
Gravitationskraft Erde – Mensch	$7 \cdot 10^{2}$
Kraft zwischen Elektron und Proton im Atom	$8 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 95.1

3. Newton´sches Axiom

Besteht zwischen zwei Körpern A und B eine Kraftwirkung, so ist die Kraft, die von A auf B ausgeübt wird, der Kraft, die B auf A ausübt, entgegengesetzt gleich.

Folgerungen aus dem 3. Newton'schen Axiom:

1) Dieses Axiom nennt man auch **Wechselwirkungsgesetz**.

2) Kräfte treten immer paarweise auf.

Abb. 96.1 *Der Läufer muss sich gegen den Erdboden mit einer abstoßenden Kraft beschleunigen.*

Abb. 96.2 *Zieht man mit der Federwaage an einer zweiten, zeigen beide die gleiche Kraft an, da auch die zweite mit der gleich großen Gegenkraft belastet ist.*

- Kraft und Gegenkraft greifen stets an zwei verschiedenen Körpern an. z.B. Start einer Rakete oder eines Läufers **(Abb. 96.1)**.

Merk & Würdig

Kräfte treten immer paarweise als **Wechselwirkungskräfte** auf. Sie sind gleich groß, parallel und entgegengesetzt gerichtet.

VORGANG	KRAFT	GEGENKRAFT
Läufer: drückt auf die Startmaschine	Muskelkraft	Reibung bzw. Gegendruck der Startmaschine
Läufer beim Beschleunigen	Resultierende abstoßende Kraft (Reibung)	Trägheitskraft des Läufers
Rakete beim Beschleunigen	Resultierende abstoßende Kraft (Trägheitskraft der Treibgase)	Trägheitskraft der Rakete

Abb. 96.3

Experiment

Experiment 1 (zu Abb. 96.3)

Wer zieht wen zu sich heran? Führe den Versuch mit einem etwa gleich schweren Partner auf Rollschuhen, Skateboards oder Schlittschuhen aus.

Gleichgültig, ob der Bub, das Mädchen oder beide gleichzeitig ziehen, immer setzen sie sich gleichzeitig in Bewegung und treffen einander (etwa) in der Mitte.

Experiment 2

Abb. 96.4 *Die Gegenkraft wird durch die Halterung aufgebracht.*

Abb. 96.5 *Die Gegenkraft wird hier durch die Gewichtskraft der (linken) Masse aufgebracht.*

Beispiel 4.2

Auf ein Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von 12 t wirkt eine beschleunigende Kraft in Bewegungsrichtung von 40 000 N ein. Welche Endgeschwindigkeit stellt sich nach 8 s ein, wenn die Geschwindigkeit zu Beginn 40 km/h betragen hat?

$v_o = 40$ km/h = 11,1 m/s

Mit $F = m \cdot a$ berechnen wir die Beschleunigung:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{40\,000\text{ N}}{12\,000\text{ kg}} = 3{,}33\text{ m/s}^2$$

Die Geschwindigkeitsänderung berechnen wir mit

$\Delta v = a \cdot \Delta t = 3{,}33\text{ m/s}^2 \cdot 8\text{ s} = 26{,}7\text{ m/s}$

Somit erhalten wir für die Endgeschwindigkeit $v = v_o + \Delta v = 37{,}8$ m/s.

Endgeschwindigkeit $v = 136$ km/h

Abb. 97.1 *Amerikanische Stretchlimousine*

Beispiel 4.3

Auf einem Flugzeugträger landet ein Jet. Welche Bremskraft muss auf ein Flugzeug mit 22 000 kg Masse einwirken, wenn es von 350 km/h auf einer Strecke von nur 95 m vollständig abgebremst werden soll?

Die Verzögerung berechnen wir aus

$$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$$

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot s} = \frac{(-69{,}4\text{ m/s})^2}{2 \cdot 95\text{ m}} = 25{,}4\text{ m/s}^2$$

Die erforderliche Bremskraft ergibt sich aus dem dynamischen Grundgesetz

$F = m \cdot a = 22\,000\text{ kg} \cdot 25{,}4\text{ m/s}^2$ **= 558 000 N**

Abb. 97.2 *F 14 Tomcat auf einem Flugzeugträger*

Die **558 kN** können nicht allein durch Scheibenbremsen und Umkehrschub aufgebracht werden. Zusätzlich bremst ein Fangseil, in das sich der Fanghaken des Flugzeugs einhängt.

Beispiel 4.4

2002 wettete Thomas Gottschalk in der Sendung „Wetten, dass …?“, dass die Bewohner von Kiel es nicht schaffen, ein Fährschiff (Länge 175 m, Breite 29 m, Masse 23 000 t) in fünf Minuten nur mit Muskelkraft 20 m weit zu ziehen.

100 Kieler meldeten sich. Gewannen sie die Wette? Wie viel an Kraft musste jeder aufbringen? Welchen Anteil hat die Reibung?

Wenn wir zunächst die Reibung nicht berücksichtigen, ergibt sich

$$\text{mit } F = m \cdot a = m \cdot \frac{2 \cdot s}{t^2} = 23 \cdot 10^6\text{ kg} \cdot \frac{2 \cdot 20\text{ m}}{(300\text{ s})^2} = \mathbf{10\,222\text{ N}}$$

Jeder Kieler musste daher nur etwas **mehr als 100 N** aufbringen.

Die Haftreibung der Schuhe ist ausreichend groß, um diese Kraft aufzubringen.

Abb. 97.3 *Fährschiff auf der Ostsee*

Aus Gründen der Sicherheit wurde das Schiff von zwei Schleppern gesichert. Die Reibung des Wassers hätte nicht ausgereicht, das Schiff innerhalb des Hafens abzubremsen.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über die Kraft.

Ü 4.10 Eine Kraft von 10 N wirkt auf eine 5 kg schwere Masse. Wie groß ist die Beschleunigung?

Ü 4.11 Eine Rakete hat eine Startmasse von 3 000 t. Wie groß müsste die Schubkraft sein, damit 4,5-fache Erdbeschleunigung (4,5 g) auftritt? (Tatsächlich werden solche Beschleunigungswerte erst erreicht, wenn der Tank fast leer ist.)

Ü 4.12 Ein Kfz (m = 2 t), das einfach nicht starten will, soll angeschoben werden. Die starken Helfer bringen eine beschleunigende Kraft von 500 N auf.

a) Berechne Beschleunigung und Geschwindigkeit nach 10 s konstanter Krafteinwirkung. (Reibungskräfte können vernachlässigt werden)

b) Welche Kraft müsste wirken, wenn eine Beschleunigung von 0,05 m/s² erzielt werden soll? Wie groß wäre dann die Geschwindigkeit nach 10 s? **(Abb. 98.1)**

Abb. 98.1 *zu Ü 4.12*

Ü 4.13 Welche konstante Kraft, die an einer 30 kg Masse angreift,

a) beschleunigt die Masse mit 3 m/s²?

b) erzeugt eine Geschwindigkeit von 8 m/s innerhalb von 5 s nach dem Start?

c) verschiebt die Masse um 50 m innerhalb von 5 s?

d) erhöht die Geschwindigkeit von 5 m/s auf 20 m/s innerhalb von 2 s?

e) verringert die Geschwindigkeit der Masse von 30 m/s auf 20 m/s innerhalb von 25 m?

Abb. 98.2 *Crashtest mit Dummy*

Ü 4.14 Speed kills I: Berechne die Trägheitskraft, die auftritt, wenn eine Person (m = 75 kg) während eines Auffahrunfalls „nach vorne geschleudert wird". Das Auto wird dabei in 0,12 s von 50 km/h auf 0 km/h gleichmäßig verzögert.

Ü 4.15 Speed kills II: Bei einem Crashtest prallt ein Auto mit 60 km/h frontal auf ein Hindernis. Auf Grund der Verformung kann auf eine Abbremsstrecke von 0,7 m geschlossen werden. Welche Kraft wirkt auf das Hindernis (Masse des Fahrzeuges 780 kg) und welche auf den Oberkörper der Versuchsperson (Dummy: Masseanteil 50 kg)?

Abb. 98.3

Ü 4.16 *The table gives some data for a Ferrari racing car at the start of a* ***Grand Prix race****:*

Speed (m/s)	*0*	*10*	*20*	*29*	*37*	*50*	*59*	*64*	*65*	*65*
Time (s)	*0*	*1*	*2*	*3*	*4*	*6*	*8*	*10*	*12*	*14*

a) *Plot a speed-time-graph for the car.*

b) *What acceleration and force is exerted by its seat at* ***i)*** *5 seconds* ***ii)*** *13 seconds?*

The car-driver´s mass is 70 kg.

Übungen

Für Ü 4.17 bis 4.20: Welche der folgenden Aussagen tri˜ t zu?

Ü 4.17 Ein bewegter Gegenstand, auf den keine Kräfte wirken,

a) kommt nach einiger Zeit zum Stillstand,
b) bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter,
c) bewegt sich gleichmäßig beschleunigt weiter.

Ü 4.18 Auf Grund des Trägheitsgesetzes kann ein Körper, auf den keine Kraft wirkt,

a) seine Geschwindigkeit ändern, aber nicht seine Richtung,
b) seine Richtung ändern, aber nicht seine Geschwindigkeit,
c) sowohl seine Richtung als auch seine Geschwindigkeit ändern,
d) weder seine Richtung noch seine Geschwindigkeit ändern.

Ü 4.19 Wenn ein Körper sich gleichförmig bewegt, dann weiß man sicher, dass

a) keine Kraft auf ihn wirkt,
b) keine Kräfte auf ihn wirken,
c) die Summe der wirkenden Kräfte null ist,
d) man keine eindeutige Antwort geben kann.

Ü 4.20 Zwei Körper haben genau dann gleiche Masse, wenn

a) ihre Beschleunigungen – bei konstant wirkender Kraft – gleich groß sind,
b) sie gleiches Volumen besitzen,
c) sie die gleiche Dichte besitzen,
d) ihre Bremswege bei konstanter Verzögerung gleich lang sind,
e) sie gleich schnell sind,
f) sie die gleiche Anzahl von Molekülen besitzen.

Ü 4.21 Richtige oder falsche Aussage: Kreuze die (entsprechende) Spalte an.

		richtig	falsch
a)	Eine Kraft von 10 000 N erteilt einer Masse von 100 kg eine Beschleunigung von 1 000 m/s^2.		
b)	Zwischen Kraft und Masse besteht direkte Proportionalität.		
c)	Die Richtung der Beschleunigung ist immer entgegengesetzt gerichtet zur Kraft.		
d)	Eine Rakete stößt sich beim Start vom Erdboden ab.		
e)	Wirkt auf eine Masse die vierfache Kraft, so ist auch die Beschleunigung viermal so groß.		
f)	Die maximale Kraft, die man mit 5 N und 3 N erzielen kann, ist 15 N.		
g)	Zum Aufrechterhalten einer Bewegung ist Kraft erforderlich.		

Ü 4.22 In **Abb. 99.1** ist die Flugbahn einer Kanonenkugel dargestellt wie man sie sich in der Zeit vor NEWTON vorgestellt hat. Was ist an der historischen Darstellung der Flugbahn falsch?

Abb. 99.1 *Darstellung aus „Problematum Astronomicorum", 1561 erschienen.*

4.5 Kraftarten *(different forces)*

4.5.1 Schwerkraft, Gewicht, Gewichtskraft *(gravitational force, weight)*

ICH GEHÖRE ZU DEN LEUTEN, DIE ERST ETWAS SEHEN MÜSSEN, UM ES ZU GLAUBEN

12-21 JIM DAVIS

JAWOHL- NEWTON HATTE RECHT

© 1981 United Feature Syndicate, Inc

Abb. 100.1 *Jeder Körper wird von der Erde angezogen. Diese Kraft nennt man* ***Gewichtskraft*** *(kurz* ***Gewicht****) oder* ***Schwerkraft****.*

Unter Gewicht versteht man die Kraft, die eine Masse infolge der Erdanziehung auf eine ruhende Unterlage ausübt. Diese Kraft ist direkt proportional zur Masse: $F \sim m$. Als Proportionalitätsfaktor misst man die Fallbeschleunigung g.

Beachte:
Masse und Gewicht sind unterschiedliche Größen mit unterschiedlichen Einheiten.

Abb. 100.2 *Federwaage*

Merk & Würdig

Gewichtskraft F_G oder **Schwerkraft**

$F_G = m \cdot g$

F_G … Gewicht(skraft), $[F_G] = N$

m … Masse, $[m] = kg$

g … Fallbeschleunigung, $g = 9{,}81\ m/s^2 \approx 10\ m/s^2$

- Die Gleichung $F_G = m \cdot g$ ist ein Sonderfall des Gravitationsgesetzes von Newton (Kapitel 6.2).
- Die Fallbeschleunigung ist ortsabhängig. Daher ist auch das Gewicht ortsabhängig.
- Ein **frei fallender** Körper ist **gewichtslos**.
- Das Gewicht eines Körpers bestimmt man mit einer **Federwaage**. (Abb. 100.2)

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über das Gewicht.

Ü 4.23 Wie groß ist das Gewicht der Luft in deinem Physiksaal? **(Abb. 100.3)**

Ü 4.24 Wie schwer ist ein 36-Tonnen-Lkw am

a) Nordpol ($g = 9{,}83\ m/s^2$) und

b) am Äquator ($g = 9{,}78\ m/s^2$)?

c) Um wie viel Prozent ist das Gewicht am Äquator geringer?

Ü 4.25 **a)** Welche Bremskraft muss ein Bremsfallschirm eines Fallschirmspringers aufbringen, wenn die (Gesamt-)Masse von 80 kg gleichmäßig in 10 s von 200 km/h auf 20 km/h abgebremst werden soll?

Hinweis: Beachte dabei auch die Gewichtskraft! Skizziere die beteiligten Kräfte!

b) Welche Bremskraft muss der Schirm aufbringen, wenn die Geschwindigkeit danach mit 20 km/h konstant bleiben soll?

Ü 4.26 *An astronaut has a mass of 64 kg. What is his weight* ***a)*** *on earth* ***b)*** *on the moon?*

Abb. 100.3 *zu Ü 4.23*

Thema & Gesellschaft

Ein brisantes verkehrspolitisches Thema wird in nächster Zeit diskutiert werden müssen. Die Richtlinie EG 96/53EG vom 25. Juli 1996 erlaubt es, dass so genannte EuroCombis auf den Straßen Europas fahren dürfen. EuroCombis sind Lkw mit bis zu 25 m Länge und 60 t Gesamtgewicht.

Vorteile:

- Platzbedarf bei einer Beladung von106 Paletten
- Geringer CO_2-Ausstoß pro Tonne beförderter Ladung

Nachteile:

- Längere Überholstrecke
- Brücken müssen wegen der größeren Belastung verstärkt werden
- Größere Schäden bei Unfällen
- Umbauten bei Kreisverkehren und Parkplätzen

Abb. 101.1

903 m
755 m
432 m
300 m
172 m
130 m

Abb. 101.2 *Platzbedarf bei einer Beladung von 106 Paletten auf unterschiedliche Transportfahrzeuge*

Überlegung:

Pkw und Lkw belasten die Straße und ihren Unterbau. Um ihre Belastung zu berechnen, verwenden die Straßenbauingenieure das ihnen seit langem bekannte Gesetz der Vierten Potenz. Es besagt, dass der Verschleiß eines Straßenbelags mit der vierten Potenz des Gewichts bezogen auf eine Achse steigt.

Ein Pkw (m = 1 t, 2 Achsen): Belastung von 500 kg pro Achse
Ein Lkw (m = 30 t, 4 Achsen): Belastung von 7 500 kg pro Achse
Ein EuroCombi (m = 60 t, 8 Achsen): Belastung von 7 500 kg pro Achse

Das ergibt $\frac{7\,500}{500}$ = 15-fache Belastung einer Achse durch Lkw bzw. EuroCombi gegenüber einem Pkw.

Durch Anwendung des Vierten-Potenz-Gesetzes ergibt sich, dass die Belastung einer Straße durch eine Lkw-Achse 15^4-mal = 50 625-mal so groß ist wie die eines Pkw mit 2 Achsen.

Berücksichtigt man die Anzahl der Achsen, so erhält man Folgendes:

Lkw mit 4 Achsen: $50\,625 \cdot 2 \approx 100\,000$-fache Belastung gegenüber Pkw
EuroCombi mit 8 Achsen: $50\,625 \cdot 4 \approx 200\,000$-fache Belastung gegenüber Pkw

„Die Presse" berichtete über die EuroCombi am 15. Dezember 2011:
„Das EU-Parlament stimmt gegen eine verpflichtende Zulassung der 60 t schweren Lkw. ‚Eine Einführung hätte negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit', so ein EU-Abgeordneter. Österreich darf weiterhin entscheiden, ob es auf seinen Straßen Gigaliner zulässt oder nicht … "

Informiere dich über dieses Thema. Finde weitere Vor- bzw. Nachteile. Stichworte: Platzbedarf, Sicherheit, Überholweg, Treibstoffverbrauch, Tunneldurchfahrten, Unfallfolgen, etc.

4.5.2 Die Reibungkraft *(friction force)*

Abb. 102.1 *Die Hauptursache der Rollreibung ist die Verformung (das „Walken“) von Rad und/oder Unterlage.*

Angenommen, ein auf einer horizontalen Unterlage ruhender Körper wird durch eine Kraft in Bewegung gesetzt. Nach dem 1. NEWTON´schen Axiom sollte sich der Körper nun auf Grund seiner Trägheit gleichförmig geradlinig weiterbewegen. Die tägliche Erfahrung lehrt jedoch etwas anderes: der Körper bewegt sich zunehmend langsamer und kommt schlussendlich wieder zur Ruhe. Der Grund dafür ist die **Reibung**.

Unter Reibung versteht man die hemmende Kraft zwischen zwei Massen, wenn sie sich unter Berührung gegeneinander bewegen. Zur Überwindung von Reibung ist Kraft notwendig.

Man unterscheidet:

- **Haftreibung** (*static friction*): Darunter versteht man den Widerstand des Körpers gegen die Bewegungsänderung, der auftritt, bevor sich der Körper in Bewegung setzt.
- **Gleitreibung** (*sliding friction*): Hat sich der Körper in Bewegung gesetzt, wirkt eine bremsende Kraft.
- **Rollreibung** (*rolling friction*): Das ist der Reibungswiderstand bei Abrollbewegungen.

Ursache der Reibung: Bei der Gleit- und Haftreibung ist ein Grund die Rauheit der beteiligten Oberflächen. Die Unebenheiten verzahnen sich und kleine Partikel werden abgerieben. Die Festigkeit der Oberfläche wird durch die elektrischen Kräfte der Elektronen (Bindungskräfte) hervorgerufen.

Durch **Schmieren** mit Schmiermitteln (z. B. mit Öl oder Fett) verringert sich die Reibung. Die beteiligten Oberflächen berühren einander nicht mehr direkt und die Reibung tritt innerhalb des Schmiermittels auf, dessen **innere Reibung** viel geringer ist.

Abb. 102.2 *Ursache der Gleit- und Haftreibung.*

Experiment

Coe˜ cient of friction

In an old book by ROBERT MILLIKAN can be read:

„A body has a weight of 800 N. If F presents the force parallel to a plane – which is necessary to maintain uniform motion in the body – the ratio $\frac{F}{F'}$ only depends on the nature of the surfaces in contact, but, in the case of small velocities, it does not depend on the area or on the velocity of the motion. The ratio $\frac{F}{F'}$ is called the coefficient of friction μ for the given materials.“

How big ist the coefficient of friction?

$$\mu = \frac{F}{F'} = \frac{300\ \text{N}}{800\ \text{N}} = 0{,}375$$

μ = 0,375

Abb. 102.3

Merk & Würdig

Die **Reibungskraft F_R** ist abhängig von der **Normalkraft F_N**.

$F_R = \mu \cdot F_N$

μ … Reibungskoeffizient, *[μ] = 1*

Abb. 102.4 *Die Reibungskraft F_R ist proportional zur Normalkraft F_N.*

Beispiele einiger Reibungszahlen		μ_H	μ_G	μ_R
Gummi auf Asphalt	trocken	0,85	0,8	0,03
	nass	0,55	0,5	
	Glatteis		0,05	
Bremsbelag auf Stahl			0,45	
Teflon auf Teflon (Gleitlager)		0,04	0,04	
Stahl auf Stahl		0,3	0,2	
Kniegelenk des Menschen		0,01	0	

Tabelle 103.1

Merk & Würdig

- Der Reibungskoeffizient μ ist abhängig von der Art der Reibung und von der Oberflächenbeschaffenheit.
- Im Allgemeinen gilt:
  Haftreibung > Gleitreibung > Rollreibung
  $\mu_H > \mu_G > \mu_R$
- Reibung erzeugt Wärme.
- *Friction always results in wasted works.*

Beispiel 4.5

Ein Pkw fährt mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h auf trockener Straße (Asphalt). Wie groß ist der Bremsweg bei nicht blockierenden Rädern?

Normalkraft = Gewichtskraft: $F_N = m \cdot g$

Haftreibung: $F_R = \mu_H \cdot F_N = \mu_H \cdot m \cdot g$

Die Haftreibung ist genauso groß wie die verzögernde Kraft: $\mu_H \cdot m \cdot g = m \cdot a$

Die Verzögerung ist somit $a = \mu_H \cdot g = 0{,}85 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 = \mathbf{8{,}34\ m/s^2}$

Den Bremsweg erhalten wir mit der Gleichung

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot a} = \frac{\left(\frac{130}{3{,}6}\ \text{m/s}\right)^2}{2 \cdot 8{,}34\ \text{m/s}^2} = \mathbf{78{,}18\ m}$$

Der Bremsweg beträgt **78 m.**

Abb. 103.1

Beispiel 4.6

Die **Zugmaschine** eines Sattelschleppers hat unbeladen 7,4 t.
Welche Zeit ist zumindest erforderlich, um das Fahrzeug aus dem Stand auf 70 km/h zu beschleunigen? Ausreichende Motorleistung ist vorhanden. Die Straße ist trocken und die Räder drehen nicht durch. **Hinterradantrieb:** Die hintere Achse trägt im unbelasteten Zustand nur 20 % des Gesamtgewichts. (Reibungskoeffizient $\mu_R = 0{,}025$)

Beim Fahren eines Autos wirkt bei niedriger Geschwindigkeit die **Rollreibung** F_R als hemmende Bewegung (Normalkraft F_N ist das Gewicht des Autos).

$F_R = \mu_R\, m \cdot g = 0{,}025 \cdot 7400\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 = \mathbf{1{,}8\ kN}$

Die **Antriebskraft** des Motors wird durch die Kraft der **Haftreibung F_H** der angetriebenen Räder auf die Straße übertragen (F_N ist das anteilige Gewicht über den angetriebenen Rädern und entspricht 20 % des Gesamtgewichts).

$F_N = 0{,}2 \cdot 7400\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 = \mathbf{15\ kN}$

$F_H = \mu_H F_N = 0{,}85 \cdot 15\ \text{kN} = \mathbf{12{,}3\ kN}$

Für die Beschleunigung wirkt aber nur $F = F_H - F_R = \mathbf{10{,}5\ kN}$

Antreibende Reibungskraft = Trägheitskraft: $F = m \cdot a$

Beschleunigung: $a = \frac{F}{m} = \frac{10{,}5\ \text{kN}}{7\,400\ \text{kg}} = \mathbf{1{,}4\ m/s^2}$

Bei konstanter Beschleunigung vergeht die Zeit $t = \frac{v}{a} = \frac{\frac{70}{3{,}6}\ \text{m/s}}{1{,}4\ \text{m/s}^2} = \mathbf{13{,}9\ s}$

Abb. 104.1

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über die Reibung.

Ü 4.27 Ein Flugzeug muss mit eingefahrenem Fahrwerk notlanden (v = 180 km/h). Wie weit schlittert das Flugzeug auf der Landebahn ($\mu = 0{,}6$, $g \approx 10\ \text{m/s}^2$, gleichmäßig verzögerte Bewegung)?

Ü 4.28 Schwergewicht: Ein Zug mit 26 Waggons von jeweils 60 Tonnen und einer Lokomotive (ausreichende Leistung der Lok ist vorhanden) von 80 Tonnen Gesamtgewicht beschleunigt vom Stillstand auf 100 km/h.

Beachte: Die Lokomotive muss die gesamte Antriebskraft auf die Schienen übertragen. ($\mu_H = 0{,}3$; $\mu_R = 0{,}003$)

Welche Zeit ist dafür

a) ohne Rollreibung, nur Haftreibung

b) mit Rollreibung

mindestens notwendig?

Abb. 104.2 *zu Ü 4.27*

Ü 4.29 Welche der folgenden Aussagen ist richtig?

Die Reibung hängt ab

a) von der Oberflächenbeschaffenheit,

b) von der Geschwindigkeit der Masse,

c) von der Dichte des Körpers,

d) von der Größe der Auflagefläche,

e) von der Masse des Körpers.

Ü 4.30 *The coefficient of friction between a block of wood and a table is 0,4. What force will be required to keep a 500 g block in uniform motion?*

4.5.3 Die Zentrifugalkraft *(centrifugal force)*

Um einen Körper von seiner geradlinigen Bahn auf eine Kreisbahn abzulenken, ist – wegen der Trägheit – eine Kraft notwendig, die zur geradlinigen Bahn normal verläuft. Diese Kraft wirkt immer zum Zentrum der Kreisbahn (zur Drehachse) hin und heißt **Zentripetalkraft** *(centripetal force)* F_p.

Auf Grund der Zentripetalkraft allein würde sich der Körper Richtung Zentrum hinbewegen. Es muss also noch eine zweite entgegengesetzt gerichtete Kraft wirken: die Zentrifugalkraft F_z. Wie hängen nun Zentrifugalkraft F_z und Zentripetalkraft F_p zusammen? Wir wollen das an Hand eines Hammerwerfers und seines Sportgerätes untersuchen.

Abb. 105.1

Merk & Würdig

Zentrifugalkraft, Fliehkraft

$$F_z = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2$$

F_z … Zentrifugalkraft, $[F_z] = N$

m … rotierende Masse, $[m] = kg$

v … Bahngeschwindigkeit, $[v] = m/s$

ω … Winkelgeschwindigkeit, $[\omega] = 1/s$

Man erkennt:

- Zentripetalkraft und Gegenkraft sind gleich groß und entgegengesetzt gerichtet. Sie greifen laut 3. Newton'schem Axiom an verschiedenen Körpern an.
- F_z und F_p sind gleich groß und entgegengesetzt gerichtet, greifen aber am gleichen Körper an.

Es wird in weiterer Folge immer nur von der Zentrifugalkraft die Rede sein.

Merk & Würdig

- Die Zentrifugalkraft tritt nur bei Rotation auf.
- Sie ist nur dann wahrnehmbar, wenn man selbst rotiert.

$F_z = \frac{m \cdot v^2}{r}$	$F_z = m \cdot r \cdot \omega^2$
Bei **konstanter Tangentialgeschwindigkeit** nimmt die Zentrifugalkraft mit zunehmendem Radius ab.	Bei **konstanter Winkelgeschwindigkeit** nimmt die Zentrifugalkraft mit dem Radius zu.

Jeder Beobachter befindet sich in einem bestimmten System, das er als sein Bezugssystem ansieht. Der Beobachter versteht und interpretiert die Vorgänge von seinem Standpunkt aus. Bei der Drehbewegung können folgende zwei Fälle unterschieden werden:

Der **ruhende Beobachter** befindet sich in einem Inertialsystem. Mittels **Zentripetalkraft** kann darin ein Körper auf eine Kreisbahn gelenkt werden.	Der **rotierende Beobachter** befindet sich in einem System, in dem er ständig gegenüber einem (ruhenden) Inertialsystem beschleunigt ist. Er verspürt eine Trägheitskraft, die nach außen gerichtet ist (**Zentrifugalkraft**).

Beispiel 4.7

Ein Auto mit einer Gesamtmasse von 1 t fährt mit 70 km/h durch eine Kurve mit einem Krümmungskreis von 100 m Radius. Berechne die Zentrifugalkraft. Wie groß muss der Haftreibungskoeffizient μ mindestens sein, damit das Auto gerade noch nicht ins Schleudern kommt?

$$F_z = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{1\,000\text{ kg} \cdot \left(\frac{70}{3{,}6}\text{ m/s}\right)^2}{100\text{ m}} = \mathbf{3\,800\ N}$$

Die Reibung muss betragsmäßig so groß sein wie die Zentrifugalkraft:

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g \Rightarrow \mu = \frac{F_z}{m \cdot g} = \frac{3\,800\text{ N}}{1\,000\text{ kg} \cdot 9{,}81\text{ m/s}^2} = \mathbf{0{,}39}$$

μ = 0,39

Abb. 106.1

Ergänzung: Ist die Fahrbahn erhöht, so kann der Erhöhungswinkel so gewählt werden, dass die resultierende Kraft normal zum Untergrund steht, die Bedingungen also wie beim Geradeausfahren sind:

$$\tan \alpha = \frac{F_z}{G}$$

Hier ergibt sich ein Winkel **° ˛ 21** °.

Beispiel 4.8

Ein Zug durchfährt eine Kurve.
Welcher Neigungswinkel ist optimal zum Durchfahren einer Kurve mit 80 km/h? Welche Höhendifferenz h ist für einen Kurvenradius $r = 0{,}8$ km, eine Geschwindigkeit $v = 80$ km/h und eine Spurweite von $b = 1{,}435$ m nötig?

Man kann für dieses Beispiel das rechtwinkelige Dreieck mit den Katheten $F_z = \frac{m \cdot v^2}{r}$ und $G = m \cdot g$ von **Abb. 106.1** benützen.

Wir verwenden die Definition des Tangens und schreiben $\tan \alpha = \frac{F_z}{G} = \frac{v^2}{g \cdot r}$;

andererseits erkennen wir aus **Abb. 106.2** $\tan \alpha = \frac{h}{b}$, sodass sich durch Gleichsetzen ergibt:

Abb. 106.2

$$h = \frac{b \cdot v^2}{g \cdot r} = \frac{1{,}435\text{ m} \cdot \left(\frac{80}{3{,}6}\text{ m/s}\right)^2}{9{,}81\text{ m/s}^2 \cdot 800\text{ m}} = \mathbf{0{,}09\ m}$$

h = 9 cm

Beispiel 4.9

Wie groß ist die Zentrifugalbeschleunigung **a)** am Äquator **b)** in Wien?

a) Äquator ($\omega = 7{,}3 \cdot 10^{-5}\text{ s}^{-1}$; siehe Seite 83, **Ü 3.51**)
$a_z = r\omega^2 \Rightarrow a_z = 6\,380\,000\text{ m} \cdot (7{,}3 \cdot 10^{-5}\text{ s}^{-1})^2 = 0{,}0339\text{ m/s}^2$
$a_z = 0{,}034\text{ m/s}^2$
Verglichen mit der Erdfallbeschleunigung gilt: $g \approx 290\ a_z$.
Die Zentrifugalbeschleunigung liefert keinen nennenswerten Beitrag zu g.

b) Die geographische Breite von Wien ($\beta \approx 48°$) ist noch zu berücksichtigen.
Der Radius des Breitenkreises, auf dem Wien liegt, berechnet sich zu $r_E = r \cdot \cos \beta$.
Somit ergibt sich für $a_z = r \cdot \cos \beta \cdot \omega^2 \Rightarrow$
$a_z = 6\,380\,000\text{ m} \cdot \cos 48° \cdot (7{,}3 \cdot 10^{-5}\text{ s}^{-1})^2 = 0{,}023\text{ m/s}^2$
$\mathbf{a_z = 0{,}023\ m/s^2}$

Abb. 106.3

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über die Zentrifugalkraft.

Ü 4.31 Mit welcher Drehzahl muss ein gefüllter Eimer in senkrechter Kreisbahn geschwungen werden, damit keine Flüssigkeit ausfließt? (Armlänge plus halbe Höhe des Eimers: $r = 1$ m)

Ü 4.32 Ein Eisläufer fährt einen Kreis mit dem Durchmesser 30 m mit der Bahngeschwindigkeit $v = 10$ m/s. Unter welchem Winkel muss er sich nach innen neigen?

Ü 4.33 Beim Eisschnelllauf ist der Radius der Innenbahn am ovalen Ende 30 m, die der Außenbahn 35 m. Um wie viel mehr Kraft bei gleicher Bahngeschwindigkeit muss der Athlet auf der Innenbahn aufbringen, um die Kurve durchfahren zu können?

Ü 4.34 In zukünftigen Weltraumstationen will man das irdische Schwerefeld simulieren. Aus diesem Grund plant man, den Stationen die Form von riesigen Rädern zu geben. Die Wohnräume sollen sich am Außenrand des Rads ($r = 100$ m) befinden.

a) Mit welcher Winkelgeschwindigkeit muss das Rad umlaufen, um außen das irdische Schwerefeld vorzutäuschen?

b) Wie lange benötigt die Station für eine Drehung?

c) Welche Geschwindigkeit hat jeder Körper in den Wohnräumen?

Ü 4.35 Ein Körper ($m = 1$ kg) wird auf einem vertikalen Kreis von $r = 1$ m gedreht. Der tiefste Punkt des Kreises befindet sich $h = 0{,}5$ m über dem Boden. Man dreht den Körper immer schneller, und bei einer bestimmten Drehzahl reißt die Schnur am tiefsten Punkt und der Körper fällt $s = 2$ m weit entfernt am Boden auf.

a) Bei welcher Frequenz reißt die Schnur?

b) Welche Kraft konnte die Schnur aushalten?

Hinweis: Die Bewegung in x-Richtung erfolgt nach dem Reißen der Schnur gleichförmig, die Zeitdauer ist durch die Fallhöhe gegeben.

Ü 4.36 Der Schwerkraft ein Schnippchen geschlagen! Wie schnell muss Lars Sohl gefahren sein? Schätze die notwendigen Daten realistisch ab. **(Abb. 107.3)**

Hinweis: Die Bahn soll als Teil eines Kreises aufgefasst werden.

Ü 4.37 *A stone of a mass 100 grams is whirled in a horizontal circle at the end of a cord 10 dm long. If the tension in the cord is 3,6 newtons, what ist the speed of the stone?*

Abb. 107.1 *zu Ü 4.34*

r
h
s

Abb. 107.2 *zu Ü 4.35*

Abb. 107.3 *zu Ü 4.36*
Lars Sohl – immer bergauf unterwegs. Er hat seine Fahrt unverletzt vollendet.

Abb. 108.1 *Kraft-Weg-Diagramm*

4.5.4 Die Federkraft *(stretching force of strings)*

Will man eine Feder dehnen oder stauchen, so ist dazu eine Kraft notwendig: die **Federkraft**.

Für die Funktion einer Feder ist Voraussetzung, dass sie nach Belastung wieder in den ursprünglichen Zustand zurückkehrt. Die Verformung sollte also **reversibel** (umkehrbar) sein.

Ist die Krafteinwirkung zu groß und wird die **Elastizitätsgrenze** überschritten, so kommt es zu einer **plastischen Verformung** der Feder und in weiterer Folge zu ihrer Zerstörung.

Merk & Würdig

Hooke´sches Gesetz

Die Federkraft ist direkt proportional zur Längenänderung x.

$$F = k \cdot x$$

F … Federkraft, $[F] = N$

k … Federkonstante, $[k] = N/m$

x … Längenänderung, $[x] = m$

Abb. 108.2 *Das Experiment zeigt, dass die Federkraft direkt proportional zur Dehnung oder Stauchung x ist. Der Zusammenhang zwischen Kraft F und Weg x wird im HOOKE´schen Gesetz[1] beschrieben.*

Abb. 108.3 *ROBERT HOOKE*

Ergänzung & Ausblick

- Das Hooke´sche Gesetz gilt näherungsweise für alle elastischen Verformungen, z. B. auch für die Dehnung eines Stahldrahtes.
- Die Federkonstante k gibt an, welche Kraft *F* erforderlich ist, um die Länge der Feder um x **(Abb. 108.2)** zu ändern.

Beispiel 4.10

Eine Spiralfeder einer Radaufhängung wird durch eine Kraft von 7,4 kN um 2,5 cm verkürzt. Wie groß ist die Federkonstante und welche Belastung verkürzt die Feder um 7,9 cm?

$$k = \frac{F}{x} = \frac{7\,400\ \text{N}}{0{,}025\ \text{cm}} = \mathbf{296\,000\ N/m}$$

Die Federkonstante beträgt **$3 \cdot 10^5$ N/m**.

$F = k \cdot x = 2{,}96 \cdot 10^5\ \text{N/m} \cdot 7{,}9 \cdot 10^{-2}\ \text{m} = \mathbf{23{,}4\ kN}$

Abb. 108.4 *Radaufhängung eines Maserati*

[1] ROBERT HOOKE (1635 Freshwater, England – 1703 London) Er verbesserte physikalische Instrumente, formulierte die Elastizitätstheorie, war Wegbereiter der mikroskopischen Forschung und entdeckte die Pflanzenzellen. Auf ihn geht der Begriff „Zelle" (*cell*) zurück.

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über die Federkraft.

Ü 4.38 Die Feder der Vorderradaufhängung eines Triumph-Sportwagens hat ohne Belastung eine Länge von 31,6 cm, bei einer Last von 400 kg eine Länge von 20,5 cm. Berechne die Federkonstante.

Ü 4.39 Zwei gleiche Federn mit der Federkonstante 230 kN/m werden mit einer Gewichtskraft von 10 kN belastet.
Wie groß ist die dabei auftretende Längenänderung

a) auf eine Feder?

b) auf zwei parallele Federn?

c) auf zwei hintereinander gehängte Federn **(Abb. 109.1)**

Abb. 109.1 *zu Ü 4.39*

Ü 4.40 Ermittle im Kraft-Weg-Diagramm **(Abb. 109.2)** jeweils die Federkonstante k. Welche Feder ist härter, welche weicher?

Federkraft in N
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
0 1 2 3 4 5
Federweg in cm

Abb. 109.2 *zu Ü 4.40*

4.6 Dynamik der Rotation *(curvilinear dynamics)*

In diesem Kapitel wird die Ursache einer **Drehbewegung (Rotation)** untersucht. Dabei reicht es nicht mehr aus, das Modell eines Massenpunktes zu benützen. Vielmehr ist es notwendig, das Modell auf einen so genannten **starren Körper** (*rigid body*), der um eine Achse rotiert, zu erweitern:

1. Wir müssen den Körper in seiner Gesamtheit betrachten.
2. Seine Rotationsachse bleibt im Raum konstant.

Gegenüber der Translation müssen nun neue Größen eingeführt werden, um die zusätzlichen Bedingungen zu berücksichtigen. Dabei besteht eine weitgehende **Analogie** zwischen der Dynamik der **Translation** und der der **Rotation**.

Translation	Rotation
Träge Masse	Trägheitsmoment
Kraft	Drehmoment
Kinetische Energie	Rotationsenergie
Impuls	Drehimpuls
Leistung	Drehleistung

Merk & Würdig

Deÿnition eines starren Körpers:

1. Ein starrer Körper ist aus **einzelnen Massenpunkten** aufgebaut, die ihre Lage zueinander unter allen Bedingungen beibehalten.

2. Es gibt eine im Raum **starre Drehachse**, um die sich alle Massenpunkte des Körpers bewegen müssen. Diese Achse kann nicht verschoben werden.

Das Auto besitzt Trägheit.

Die Reifen besitzen ein Trägheitsmoment.

Abb. 110.1 *Der Motor eines beschleunigenden Autos überwindet die Trägheit des Fahrzeugs und das Trägheitsmoment der Räder.*

Merk & Würdig

Trägheitsmoment

$J \,\dot{}\, m \cdot r^2$

$[J] = \mathrm{kgm}^2$

m … (rotierende) Masse, $[m] = kg$

r … (charakteristischer) Radius eines rotierenden Körpers, $[r] = m$

Reifen — Scheibe
gleicher Radius r
gleiche Masse m
großes — kleines
Trägheitsmoment J

Abb. 110.3 *Trotz gleicher Masse und gleicher Radien besitzen Reifen und Scheibe verschiedenes Trägheitsmoment.*

4.6.1 Das Trägheitsmoment *(moment of inertia)*

Wie wir bereits wissen, ist es zu Beginn einer (translatorischen) Bewegung notwendig, die **Trägheit** des Körper zu überwinden. Will man einen Körper in Rotation versetzen, so ist gleichfalls hier die Überwindung der Trägheit notwendig **(Abb. 110.1)**. Allerdings ist nun zu berücksichtigen, dass jeder Massenpunkt eine andere Umfangsgeschwindigkeit und damit auch eine andere Beschleunigung besitzt.

Wovon hängt nun das Beharrungsvermögen eines rotierenden Körpers, das so genannte **Trägheitsmoment *J***, ab?

Versuche zeigen, dass nicht nur die Masse und die Abmessungen des rotierenden Körpers einen Einfluss auf das Trägheitsmoment haben, sondern auch die Verteilung der Masse.

Allgemein gilt: Das Trägheitsmoment J wächst mit der Masse m eines rotierenden Körpers und mit dem Quadrat der jeweiligen Entfernung r der Massenpunkte von der Drehachse. Das bedeutet, dass sich die einzelnen Massenpunkte bei der Drehung umso mehr bemerkbar machen, je weiter sie von der Drehachse entfernt sind **(Abb. 110.2)**.

Kugel: $J = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$ — Zylinder: $J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$ — Kegel: $J = \frac{3}{10} \cdot m \cdot r^2$ — Stab: $J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$

Abb. 110.2 *Trägheitsmomente J von homogenen Körpern; die Gleichungen gelten nur für die eingezeichneten Rotationsachsen (S … Schwerpunkt des Rotationskörpers).*

Beispiel 4.11

Wie groß ist das Trägheitsmoment der Erde? Dabei soll die Erde als ideale und homogene Kugel betrachtet werden.
$m = 6 \cdot 10^{24}$ kg, $r = 6\,380$ km

Für die Erde als Kugel gilt: $J = \frac{2}{5} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{r}^2$

Also: $J = \frac{2}{5} \cdot 6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg} \cdot (6\,380\,000\ \mathrm{m})^2 = 9{,}87 \cdot 10^{37}\ \mathrm{kgm}^2$

$\boldsymbol{J = 9{,}9 \cdot 10^{37}\ \mathrm{kgm}^2}$

Beispiel 4.12

Welchen Radius hat eine Kreisscheibe (m = 20 kg), deren Trägheitsmoment 2 kgm² beträgt?

Eine Kreisscheibe ist ein flacher Zylinder; daher berechnen wir aus $J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$ den gesuchten Radius

$r = \sqrt{\frac{2 \cdot J}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2\ \mathrm{kgm}^2}{30\ \mathrm{kg}}} = \mathbf{0{,}365\ m}$

r = 37 cm

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über das Trägheitsmoment.

Ü 4.41 Die **Abb. 111.1** zeigt die Achsen mit dem kleinsten und dem größten Trägheitsmoment. Wie verhalten sie sich?

$l = 16$ cm; $d = 7$ mm

Hinweis: Der Bleistift ($\rho = 900$ kg/m^3) soll als homogen, rund und ungespitzt angenommen werden.

Ü 4.42 Um wie viel muss man den Radius einer Kugel vergrößern, damit sich das Trägheitsmoment verdoppelt?

Ü 4.43 Bei einem Zylinder wird **a)** der Radius **b)** die Höhe verdoppelt. Wie ändert sich das Trägheitsmoment?

Abb. 111.1 *zu Ü 4.41*

4.6.2 Das Drehmoment *(torque)*

Um einen Körper in Rotation zu versetzen, reicht es nicht aus, eine Kraft wirken zu lassen. In **Abb. 111.2** wirken die Kräfte F_1, F_2 und F_3 auf den Körper. F_1 und F_2 versetzen den Körper in eine Rotation, F_3 hingegen nicht.

Dazu sagt man auch: Die Kräfte F_1 und F_2 verursachen ein so genanntes Drehmoment M. Die Kraft F_1 erzeugt das **Drehmoment** M_1 und F_2 erzeugt das Drehmoment M_2. Dieses ist auch vom Normalabstand der Kraft (oder ihrer Verlängerung) von der Rotationsachse abhängig.

Das Produkt aus wirkender Kraft und dem Normalabstand dieser Kraft zur Rotationsachse nennt man Drehmoment M:

$$\boldsymbol{M = F \cdot r}$$

Aus der Definition des Drehmoments $M = F \cdot r$ lässt sich auch die Gleichung $M = J \cdot \alpha$ ableiten:

$$M = F \cdot r = m \cdot a \cdot r = m \cdot r \cdot \alpha \cdot r = m \cdot r^2 \cdot \alpha = J \cdot \alpha$$

Diese Gleichung nennt man auch das **Dynamische Grundgesetz der Rotation**.

Abb. 111.2 *Nur die Kräfte F_1 und F_2 verursachen ein Drehmoment M.*

Ergänzung & Ausblick

- Um Verwechslungen zwischen den (gleichen) Einheiten des Drehmoments M und der Arbeit W zu verhindern, wurde festgelegt:
  $[W] = 1$ J, $[M] = 1$ Nm

  Man kann daher bereits an der Einheit erkennen, ob es sich um die Angabe einer Arbeit oder eines Drehmoments handelt:

  Beispiel: $W = 50$ J … Arbeit

  $M = 50$ Nm … Drehmoment
- Jeder Körper, auf den ein Drehmoment wirkt, kann als Hebel bezeichnet werden.
- Wird ein Körper beschleunigt verschoben, muss eine **Kraft** wirken.

  Wird ein Körper beschleunigt (immer schneller) gedreht, muss ein **Drehmoment** wirken.
- Ein ruhender starrer Körper verharrt weiter im Zustand der Ruhe, wenn an ihm die Summe angreifender Kräfte und **Drehmomente** null ist.

  $\Sigma F_i = 0$

  $\Sigma M_i = 0$

  Diese Gleichgewichtsbedingungen sind die zentralen Gleichungen der **Statik**.

Merk & Würdig

Dynamisches Grundgesetz der Rotation

$\boldsymbol{M = J \cdot \alpha}$

M … Drehmoment, $[M] = Nm$

J … Trägheitsmoment, $[J] = kgm^2$

α … Winkelbeschleunigung, $[\alpha] = s^{-2}$

Gleichgewichtsbedingung

ˆ $\boldsymbol{F_i = 0}$

ˆ $\boldsymbol{M_i = 0}$

Der Begri˝ des Gleichgewichts

Stabiles Gleichgewicht	Indi˝ erentes Gleichgewicht	Labiles Gleichgewicht
Drehachse A S Im stabilen Gleichgewicht liegt der Schwerpunkt genau senkrecht unter der Drehachse.	Drehachse A=S Im indifferenten Gleichgewicht liegt die Drehachse im Schwerpunkt.	Im labilen Gleichgewicht liegt der Schwerpunkt genau senkrecht über der Drehachse. S A Drehachse
Abb. 112.1	**Abb. 112.2**	**Abb. 112.3**
*A rigid body is in a **stable equilibrium** if the system returns to the equilibrium state itself.*	*A rigid body is in an **indiˇ erent or neutral equilibrium** if a force moves the body only in rotation.*	*A rigid body is in an **unstable equilibrium** if the system moves farther away from its equilibrium state.*
650 kg 800 kg		
Abb. 112.4	**Abb. 112.5**	**Abb. 112.6**
Der Wiener Rathausmann (auf der Spitze des Wiener Rathauses) wird durch eine schwere Kugel, die an seinen Beinen befestigt ist, im stabilen Gleichgewicht gehalten.	Riesenrad im Wiener Prater	Das labile Gleichgewicht kann durch ständiges Balancieren nur kurzzeitig realisiert werden.

Der Begri˝ des Hebels

Unter einem Hebel versteht man einen Körper, der um eine Achse drehbar gelagert ist bzw. gelagert werden kann. Mit ihm lassen sich große Massen mit wenig Kraftaufwand heben. Das entsprechende Gesetz – das Hebelgesetz – wurde bereits um 200 v. Chr. von ARCHIMEDES[1] formuliert.

Merk & Würdig !

Hebelgesetz

Kraft · Kraftarm = Last · Lastarm

$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$

[1] ARCHIMEDES (um 287 v. Chr. Syrakus – 212 v. Chr. Syrakus) berechnete π und gilt als „Vater" der mathematischen Physik. Er leitete das Hebelgesetz ab und formulierte das nach ihm benannte Gesetz des Auftriebs, das er – so wird erzählt – im Waschzuber badend erkannte. Worauf er nackt und laut „Heureka!" rufend durch Syrakus gerannt sein soll.

Allen einfachen Maschinen liegt die **Goldene Regel der Mechanik** zu Grunde:

Es ist nicht möglich, sich durch eine geeignet konstruierte Maschine Arbeit zu ersparen.

Einarmiger Hebel		Zweiarmiger Hebel	
Abb. 113.1	Bei einem einarmigen Hebel befinden sich die beiden wirkenden Kräfte auf einer Seite des Drehpunktes. Beispiele: Flaschenöffner, Schraubenschlüssel	Abb. 113.2 „Gib mir einen festen Punkt, und ich werde die Erde bewegen." ARCHIMEDES	Bei einem zweiarmigen Hebel befinden sich die beiden wirkenden Kräfte auf verschiedenen Seiten des Drehpunktes. Beispiele: Zange, Schere, Balkenwaage

Rollen

Rollen sind besonders geformte Hebel.

Die feste Rolle	Die lose Rolle	Der Flaschenzug	Der Di˝ erential˙ aschenzug
F Last $G = 1$ kN G Abb. 113.3	F G Abb. 113.4	F G Abb. 113.5	R r F G Abb. 113.6
Anzahl der tragenden Seile			
$n = 1$	$n = 2$	$n = 4$	$n = 2$
Notwendiger Kraftaufwand			
$F = G$ $F = 1000$ N	$F = \frac{G}{2}$ $F = 500$ N	$F = \frac{G}{4}$ $F = 250$ N	$F = G \cdot \frac{R - r}{2R}$ $F = 125$ N ($R = 20$ cm, $r = 15$ cm)

Beispiel 4.13

Um eine Scheibe ($m = 3$ kg, $r = 25$ cm) ist eine Schnur gelegt, an der man mit $F = 10$ N zieht **(Abb. 114.1)**. Welche Winkelgeschwindigkeit erzielt man nach 5 s?

Es gilt $\omega = \alpha \cdot t$ (aus der Definition der Winkelbeschleunigung) und $M = J \cdot \alpha$.

Kombiniert man die Gleichungen, so erhält man $\omega = \frac{M \cdot t}{J}$

Das wirkende Drehmoment beträgt $M = F \cdot r$ und $J_{Scheibe} = \frac{1}{2} \cdot m\, r^2$

Die Scheibe wird als Zylinder aufgefasst), so dass man für ω erhält:

$$\omega = \frac{F \cdot r \cdot t \cdot 2}{m \cdot r^2} = \frac{2 \cdot F \cdot t}{m \cdot r} = \frac{2 \cdot 10\text{ N} \cdot 5\text{ s}}{3\text{ kg} \cdot 0{,}25\text{ m}} = \mathbf{133{,}3\ s^{-1}}$$

ˆ = 133 s $^{-1}$

Abb. 114.1

Beispiel 4.14

Die **Abb. 114.2** zeigt 5 verschiedene Pedalstellungen eines Fahrrades. Berechne das jeweils auftretende Drehmoment. (Die Angaben sind der **Abb. 114.2** zu entnehmen.)

Wegen Symmetrie gilt: Stellung a) = e), Stellung b) = d)

$M_c = 0$

$M_b = M_d = F \cdot \frac{0{,}1}{\sqrt{2}}\text{ m} = 500\text{ N} \cdot \frac{0{,}1}{\sqrt{2}}\text{ m} = \mathbf{35{,}4\ Nm}$

$M_a = M_e = F \cdot r = 500\text{ N} \cdot 0{,}1\text{ m} = \mathbf{50\ Nm}$

Abb. 114.2

Beispiel 4.15

Eine Garnrolle ist unter die Bank gerollt. Wie muss man ziehen, damit sie nach vorne rollt?

Zieht man am Faden, der um die Garnrolle gewickelt ist, mit der Kraft F, so kann man die folgenden drei Fälle unterscheiden:

Abb. 114.3

Abb. 114.4

Abb. 114.5

Abb. 114.6

Die Rotationsachse der Garnrolle ist die Berührungsgerade A mit dem Fußboden. Damit verursacht die Kraft F ein Drehmoment. Im Fall 1 ist das Drehmoment rechtsdrehend, und genau das ist gefragt. **Am Faden muss also ˙ ach gezogen werden.** Wichtig ist aber auch der Fall 2: In diesem Fall wird die Spule nur gezogen. Sie dreht sich nicht.

In **Abb. 114.4** erkennen wir ein rechtwinkeliges Dreieck (in **Abb. 114.6** noch einmal gezeichnet), aus dem wir diesen Garnwinkel α berechnen können:

$$\cos \alpha = \frac{r}{R}$$

Was kann man über Fall 3 aussagen?

Beispiel 4.16

Der Schwerpunkt einer beladenen Schubkarre ist 60 cm von der Radachse entfernt. Mit welcher Kraft muss an den 1,7 m von der Radachse entfernten Griffen angehoben werden, um eine Masse von 200 kg heben zu können?

Anwendung des Hebelgesetzes ergibt:

$G \cdot d_1 = F \cdot d_2$

Also: $F = m \cdot g \frac{d_1}{d_2} = 200 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2 \frac{0{,}6 \text{ m}}{1{,}7 \text{ m}} = \mathbf{692{,}5 \text{ N}}$

F = 692 N

Abb. 115.1

Beispiel 4.17

An den Enden einer 2 m langen Stange hängen zwei Körper mit 30 kg und 50 kg Masse. In welchem Punkt muss die Stange unterstützt werden, um sie im Gleichgewicht zu halten?

Damit Gleichgewicht herrscht, muss $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ gelten.
Da die Gesamtlänge $l = l_1 + l_2$ ist, ergibt sich $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot (l - l_1)$.

$$l_1 = \frac{F_2}{F_1 + F_2} \cdot l = \frac{m_2 \cdot g}{m_1 \cdot g + m_2 \cdot g} \cdot l = \frac{50 \text{ kg}}{30 \text{ kg} + 50 \text{ kg}} \cdot 2 \text{ m} = \mathbf{1{,}25 \text{ m}}$$

Die Unterstützung muss 1,25 m vom Ende der Stange mit dem leichteren Gewicht angebracht werden.

Abb. 115.2

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, testest du deine Kenntnisse über das Drehmoment.

Ü 4.44 Ein 4 m langer Stab ist an einem Ende drehbar gelagert. 1 m vom drehbaren Ende entfernt greift eine Kraft $F = 150$ N an. Welches Drehmoment wird ausgeübt?

Ü 4.45 Wo muss man einen 2 m langen Hebel unterstützen, wenn eine 150 kg schwere Last gehoben werden soll, aber nur 450 N aufgewendet werden können?

Ü 4.46 Die Masse der Beladung ist realistisch abzuschätzen. **(Abb. 115.4)**

Ü 4.47 Peter will für seine Schwester Angelika ein Mobile bauen. Dazu möchte er auf jeden Fall einen schönen Stein ($m = 0{,}5$ kg), den Angelika gefunden hat, verarbeiten. In einer Bastelzeitschrift hat er die Zeichnung in **Abb. 115.5** entdeckt.

Abb. 115.5 *zu Ü 4.47*

Leider gab es keine Angaben für m_A und m_B. Kannst du Peter helfen?
Wie groß sind m_A und m_B?
Welche Kraft F muss der Befestigungsfaden aushalten?

Abb. 115.3 *zu Ü 4.45*

Abb. 115.4 *zu Ü 4.46*

5 Energie und Impuls

In diesem Kapitel geht es um

- mechanische Arbeit
- Energie und Energiearten
- Leistung und Wirkungsgrad
- Impuls und Kraftstoß
- das Prinzip der Energieerhaltung
- den Impulserhaltungssatz
- Stoßvorgänge

Unt. L
11.06.

5.1 Arbeit und Energie *(work and energy)*

5.1.1 Mechanische Arbeit *(mechanical work)*

Der Begri˜ Arbeit ist im naturwissenschaftlichen Zusammenhang genau definiert – im Gegensatz zum Alltag! (Im Alltag verbindet man mit Arbeit in etwa eine sich wiederholende und/oder mühsame körperliche, aber auch geistige Tätigkeit.)

Naturwissenschaftliche Deÿnition:

Wird ein Körper unter Einwirkung von Kraft verschoben, dann wird **mechanische Arbeit *W*** verrichtet.

Beispiele, mechanische Arbeit zu verrichten, sind so vielfältig wie die Vielfalt der Kräfte:

- beim Heben,
- beim Beschleunigen,
- beim Überwinden von Reibung oder
- bei der Verformung eines Körpers,

immer wird unter **Ein˛uss einer Kraft ein Weg** zurückgelegt.

Abb. 117.1 *Hier wird **Arbeit** verrichtet: Eine Kraft wirkt lotrecht nach oben, und die Körper überwinden einen Weg (Höhe).*

Abb. 117.2 *Eine Zugmaschine übt auf einen Anhänger eine Kraft F aus und beschleunigt ihn dabei. Die am Anhänger verrichtete Arbeit ist umso größer, je größer die Kraft F und je länger der Weg s ist.*

Abb. 117.3 ***Kraft-Weg-Diagramm:*** *Der Flächeninhalt unter dem Graphen kann als verrichtete Arbeit W interpretiert werden. Bei konstanter Kraft gilt: $W = F_s \cdot s$*

Merk & Würdig

Die Größe der bei einem Vorgang verrichteten **mechanischen Arbeit W** errechnet sich aus dem **Produkt** von **Kraft** und dem zurückgelegten **Weg** (in Kraftrichtung). Die *SI-Einheit* der Arbeit ist das Joule *(J)*[1].

$W = F_s \cdot s$

$[W] = J, \qquad 1 \cdot J = N \cdot m = 1\ kg \cdot m^2/s^2$

s … Weg, $[s] = m$

F_s … Kraft in Wegrichtung, $[F_s] = N$

Wenn Kraft und Weg aufeinander **normal** stehen, wird keine Arbeit verrichtet! Beispielsweise beim Tragen eines schweren Koffers in der Ebene: Die Gewichtskraft des Koffers steht normal zum Weg, es wird keine Arbeit verrichtet. (Ist man allerdings mit dem Koffer besonders flott unterwegs, dann wird möglicherweise die Arbeit gegen die Kraft des Luftwiderstandes nicht mehr vernachlässigbar klein sein.)

Abb. 117.4 *JAMES JOULE*

[1] JAMES P. JOULE (1818 Salford bei Manchester – 1889 Sale bei London). Die Einheit von Arbeit und Energie wurde ihm zu Ehren Joule genannt. Der englische Physiker lebte als Brauereibesitzer und Privatgelehrter. Er stellte unter anderem Untersuchungen über die Wärmeentwicklung in mechanischen und elektrischen Systemen an und entdeckte das nach ihm benannte Joule'sche Gesetz. Dieses Gesetz ermöglicht jene Wärme zu berechnen, die in einem stromdurchflossenen Draht entsteht. Joule bestimmte die Gleichartigkeit zwischen mechanischer Energie und Wärme. Er experimentierte mit Elektromagneten und entdeckte die Magnetostriktion.

Abb. 118.1 ***Vektorzerlegung*** *(F wird in F_N und F_s zerlegt.)*

Abb. 118.3 *Kraft verrichtet nicht immer Arbeit: Der Arme könnte es sich leicht machen und das Geschenkpaket hinter sich abstellen - das käme auf das Gleiche heraus …*

Abb. 118.4 *Die **Hubarbeit ist unabhängig vom gewählten Weg**. Nur Gewicht und Höhendifferenz zählen!*

Die mechanische Arbeit lässt sich nur dann so einfach mit der Formel W = F · s berechnen, wenn Kraft und Weg parallel zueinander verlaufen. Häufig ist dies aber nicht der Fall. In solchen Fällen muss nur jene Kraftkomponente berücksichtigt werden, die zum Weg parallel gerichtet ist (F_s). Grafisch lässt sich diese Parallelkomponente durch **Vektorzerlegung** finden **(siehe Abb. 118.1)**

Abb. 118.2 *Kraft F und Weg s sind nicht parallel. Nur die Komponente der Kraft in Wegrichtung F_s trägt zur Arbeit bei.*

Kraft verrichtet nicht immer mechanische Arbeit. Hält man einen schweren Gegenstand ruhig in der Hand, auch wenn er noch so schwer ist, es wird trotzdem keine mechanische Arbeit verrichtet! Ursache: Es wird kein Weg zurückgelegt.

Man unterscheidet:

- **Hubarbeit:**

  Wird ein Körper der Masse m gehoben, so muss eine Kraft aufgewendet werden, die der Gewichtskraft $F = m \cdot g$ entgegengesetzt wirkt. Der zurückgelegte Weg s in Richtung der Gewichtskraft ist die Hubhöhe h. Setzt man Höhe und Gewichtskraft in die Formel $W = F \cdot s$ ein, ergibt sich

  die **Hubarbeit:** $W_H = F \cdot s = m \cdot g \cdot h$

  – **Arbeit ist wegunabhängig:** Bei der Erstellung der Formel $W_H = m \cdot g \cdot h$ wurde bedacht, dass die Gewichtskraft $F = m \cdot g$ und der Weg parallel sind! (Die Wegstrecke ist deshalb gleich der Höhendifferenz h.)

    Geht man nicht den direkten Weg zu einem hoch gelegenen Ziel und nimmt, weil es weniger anstrengend ist, einen Umweg in Kauf, so ist die Hubarbeit trotzdem immer die gleiche! Auch wenn man den schweißtreibenden direkten Weg gewählt hat **(siehe Abb 118.4)**.

    Begründung: Zerlegt man den „Umweg" vektoriell in Wegstrecken, die in Richtung Gewichtskraft zeigen, ergibt sich wieder als Parallelkomponente zur Kraft die Höhendifferenz.

  – **Erdnähe:** Die Beziehung $W_H = m \cdot g \cdot h$ gilt nur, wenn sich die Gewichtskraft im Verlauf des Weges nicht ändert. Nur in der Nähe der Erdoberfläche können wir mit g = 9,81 m/s² rechnen. Für die Hubarbeit in größere Höhen, wo die Fallbeschleunigung g kleiner ist (z.B. Satellitentransport einer Rakete) gelten andere mathematische Beziehungen! (Siehe Kapitel 6)

Merk & Würdig

Hubarbeit:

$\boldsymbol{W_H = m \cdot g \cdot h}$

m … Masse, $[m] = kg$

g … Fallbeschleunigung, $[g] = m/s^2$

h … Höhendifferenz, $[h] = m$

Beispiel 5.1

Eine Estrichpumpe pumpt zwei Stunden lang eine Betonmischung für den Fußbodenaufbau vom Erdgeschoß in den zweiten Stock eines Neubaus.

Welche Arbeit muss die Pumpe leisten, wenn sie 1,5 m^3 Beton pro Stunde in eine Höhe von 7 m hoch pumpen kann? (Einbaudichte der Estrichmasse: 2 100 kg/m^3)

In zwei Stunden werden 3m^3 Beton hoch gepumpt. Die Masse kann aus der Formel der Dichte bestimmt werden:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho \cdot V = 2\,100\ kg/m^3 \cdot 3\ m^3 = \mathbf{6\,300\ kg}$$

Für die Hubarbeit ergibt sich:

$$W_H = m \cdot \rho \cdot h = 6\,300\ kg \cdot 9{,}81\ m/s^2 \cdot 7\ m = \mathbf{433\ kJ}$$

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du zum Thema Hubarbeit nach einer Analyse der Fragestellungen Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 5.1 **Kraftwerk Kaprun:** Eine Pumpe leitet Wasser mit einer Förderleistung von 3 000 l/min in einen Speichersee. Welche Arbeit wird von der Maschine pro Stunde verrichtet, wenn der Höhenunterschied 200 m beträgt?

Ü 5.2 **Laura (55 kg)** muss, um Schokolade zu naschen, ein Regal erklimmen. Welche Arbeit ist dazu notwendig? (Höhendifferenz: 1,5 m) Welche Menge Schokolade muss sie danach mindestens genießen, um ihrem Körper die eingesetzte Energie wieder zuzuführen? (Brennwert von 100 g Schokolade ca. 1 700 kJ)

Ü 5.3 **Laura (noch immer 55 kg)** verspeist eine halbe Gurke (200 g, Brennwert ca. 100 kJ). Wie hoch müsste ein Berg sein, auf den sie steigt, um die zugeführte Energie von 100 kJ in Form von Hubarbeit wieder abzuarbeiten?

- **Beschleunigungsarbeit:**

  Um einen Körper auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu beschleunigen, muss eine Kraft wirken. Dabei wird eine Wegstrecke *s* zurückgelegt, sodass **Beschleunigungsarbeit** verrichtet wird.

  Angenommen, es liegt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit einer konstant wirkenden Kraft $F = m \cdot a$ vor, dann kann die Beschleunigungsarbeit über die Zusammenhänge aus Kapitel 3.4 ermittelt werden:

  Formeln der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \text{ und } v = a \cdot t$$

t … Zeit, a … Beschleunigung,
v … erreichte Geschwindigkeit, s … während der Zeit t zurückgelegter Weg

Für die **Beschleunigungsarbeit W_a** ergibt sich:

$$W_a = F \cdot s = (m \cdot a) \cdot \left(\frac{a}{2} \cdot t^2\right) = m \cdot \frac{(a \cdot t)^2}{2} = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

Hinweis: Das Ergebnis der Ableitung gilt allgemein, also auch für den Fall, dass es sich um eine ungleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt.

Abb. 119.1

Beispiel 5.2

Cordula fährt gerne Fahrrad und beschleunigt nach Kreuzungen besonders toll (stärker als manch motorisierter sportlicher „Flitzer"). Welche **Beschleunigungsarbeit** ist notwendig, um auf eine Geschwindigkeit von 25 km/h zu kommen? (Masse von Cordula + Fahrrad: 60 kg)

$$W_a = m \cdot \frac{v^2}{2} = 60\ kg \cdot \frac{(6{,}94\ m/s)^2}{2} = \mathbf{1{,}44\ kJ}$$

- **Reibungsarbeit** oder Arbeit gegen den Luftwiderstand:
  Die Reibungskraft und auch der Luftwiderstand wirken in Richtung der Fortbewegung. Daher kann die Formel $W = F \cdot s$ direkt verwendet werden.

Beispiel 5.3

Welche **Reibungsarbeit** wird verrichtet, wenn ein Schlitten über eine Strecke von 100 m mit konstanter Kraft von 300 N gezogen wird?

$W_R = F_s \cdot s = 300\,N \cdot 100\,m = \mathbf{30\,kJ}$
Bemerkung: Vorausgesetzt ist, dass mit 300 N wirklich die Komponente der Zugkraft angegeben ist, die parallel zum Weg verläuft!

Merk & Würdig

Mechanische Arbeit *W*: $W = F_s \cdot s$

Hubarbeit: $W_H = m \cdot g \cdot h$

Reibungsarbeit: $W_R = F_s \cdot s$

Beschleunigungsarbeit: $W_a = m \cdot \frac{v^2}{2}$

W … Arbeit, $[W] = J$ (Joule)
h … Höhe, $[h] = m$
g … Fallbeschleunigung, $g = 9{,}81\,m/s^2$
F_s … Kraft in Wegrichtung, $[F_s] = N$
v … Endgeschwindigkeit, $[v] = m/s$
m … Masse, $[m] = kg$
s … Weg, $[s] = m$

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Arbeit Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 5.4 **Reibungsarbeit:** Welche Arbeit verrichtet eine E-Lok in 10 min, wenn sie auf waagrechter Strecke einen Rangierzug von 1 500 t mit der konstanten Geschwindigkeit von 72 km/h verschiebt und der (Roll-) Reibungskoeffizient 0,005 beträgt?

Ü 5.5 **Martina kann gut Fußball spielen.** Sie beschleunigt beim Abschuss einen Fußball ($m = 0{,}5$ kg) auf eine Geschwindigkeit von 95 km/h. Welche Arbeit muss Martina dafür am Ball verrichten?

Ü 5.6 Baue mit den durchgeschüttelten Textbausteinen eine Mauer. Bausteine, die du nicht benötigst, wirfst du auf den Müllhaufen. (Abb. 120.1)

Abb. 120.1 *Wenn du die „Textbausteinmauer" aufstellen kannst, dann beschreibst du fachgerecht Vorgänge in der Natur.*

5.1.2 Die Energie *(energy)*

Körper, an denen Arbeit verrichtet wurde, sind dadurch in der Lage, selbst Arbeit zu verrichten:

- **Gehobene Körper** können beim Sinken etwas anderes heben (z. B.: Gegengewichte in Liftanlagen, Wippschaukel).
- Einmal in **Bewegung gesetzte Körper** können andere Körper antreiben (z. B.: Wasser oder Wind treibt Turbine an).

Diese Fähigkeit von Körpern, Arbeit zu verrichten, wird **Energie *E*** genannt.

Die Begriffe Arbeit und Energie stehen also in einer sehr nahen Beziehung. Sie besitzen auch **dieselbe Einheit Joule!**

Folgende Vorgänge sind Beispiele, wie die Begriffe Arbeit und Energie fachgerecht benützt werden:

- Die Energie eines Körpers nimmt zu, wenn an ihm Arbeit verrichtet wird. Die Energie nimmt ab, wenn der Körper selbst Arbeit verrichtet.
- Energie umwandeln heißt Arbeit verrichten.
- Energie ist gespeicherte Arbeit.
- Energie wird nicht vernichtet oder erschaffen; Energie kann nur von einer Art in eine andere umgewandelt werden! **(Prinzip der Energieerhaltung, siehe Kapitel 5.4)**

Abb. 121.1

Merk & Würdig

Energie *E*

***[E] = J* (Joule)**

Energie ist die Arbeitsfähigkeit eines Systems.

Arbeit ist die mechanische Form der Energieübertragung.

5.1.3 Energiearten: *(variations of energy)*

Energie kann in verschiedenen Formen auftreten. Beispiele für mechanische Energien sind:

- **Potenzielle Energie:**

  Wurde ein Körper gegen die Schwerkraft angehoben, spricht man von potenzieller Energie. Die am Körper verrichtete Hubarbeit $W_H = m \cdot g \cdot h$ ist nun im Körper in Form von **potenzieller Energie E_{pot}** gespeichert:

Merk & Würdig

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

E_{pot} … potenzielle Energie, $[E_{pot}] = J$

m … Masse, $[m] = kg$

g … Fallbeschleunigung, $[g] = 9{,}81\ m/s^2$

h … Höhendifferenz, $[h] = m$

Die verrichtete Hubarbeit ist also nicht verloren.

Beim Absinken des Körpers wird diese potenzielle Energie wieder durch Verrichten von Arbeit abgebaut.

Abb. 121.2 ***Lünersee (Vorarlberg):*** *Der Stausee eines* ***Speicherkraftwerkes*** *enthält riesige Energiemengen. Das Wasser durchläuft einen* ***energetischen Kreisprozess:*** *Verdunstung (Hubarbeit durch Sonnenenergie), Kondensieren (Regen), Stromgewinnung, Verdunstung …*

- **Kinetische Energie:**

  Wurde gegen die Trägheit beschleunigt, also Beschleunigungsarbeit am Körper verrichtet, dann besitzt der Körper **Bewegungsenergie** oder **kinetische Energie E_{kin}**.

Merk & Würdig

$$E_{kin} = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

E_{kin} … kinetische Energie, $[E_{kin}] = J$

v … Endgeschwindigkeit, $[v] = m/s$

m … Masse, $[m] = kg$

Abb. 122.1 *Dieser* ***Meteoriteneinschlag*** *in der Nähe der tschechisch-polnischen Grenze konnte am 21. Januar 1999 fotografisch festgehalten werden.*

Abb. 122.2 Der ***Barringer-Krater*** *in Arizona besitzt einem Durchmesser von 1,1 km*

Der Flächeninhalt entspricht der verrichteten Arbeit.

Kraft F in N; Dehnung x in m; $k \cdot x$; $F = k \cdot x$; $W_S = \frac{k \cdot x^2}{2}$

Abb. 122.3 ***Kraft-Weg-Diagramm***

Beispiel 5.4

Meteoriten

haben auf Grund ihrer großen Geschwindigkeit eine hohe kinetische Energie. Die meisten verdampfen vollständig in der Atmosphäre. Dagegen behalten schwere Stein- oder Eisenmeteoriten ihre Geschwindigkeit von bis zu 30 km/s praktisch unverändert bei. Trifft ein solcher Meteorit beispielsweise auf die Erde, wird sehr viel Energie freigesetzt. So entstehen Krater von beträchtlichem Ausmaß.

Welche kinetische Energie hat ein schwerer Meteor (20 000 kg) mit einer Geschwindigkeit von 30 km/s?

$$E_{kin} = m \cdot \frac{v^2}{2} = 2 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \frac{(3 \cdot 10^4 \text{ m/s})^2}{2} = 9 \cdot 10^{12} \text{ J} = \mathbf{9\ TJ}$$

Diese Energie würde ausreichen, um 10 Saturnraketen in den Weltraum zu schießen oder 500 000 Vollbäder zu nehmen!

- **Innere Energie:**

  Energie, die in den Atomen und Molekülen von Körpern oder Gasen gespeichert ist, nennt man **Innere Energie**. Beim Reiben zweier Körper führt die zu leistende Arbeit zur Erhöhung der Inneren Energie – die Temperatur steigt dabei an! Die **Wärmeenergie** ist, wenn man es genau nimmt, eine mechanische Energie: die Bewegungsenergie mikroskopisch kleiner Teilchen.

- **Federenergie:**

  Zum Spannen einer Feder ist Arbeit erforderlich. Diese bleibt – bis auf Wärmeenergie in der Feder (Innere Energie) – als Energie gespeichert.

  Zum Berechnen der Arbeit darf nicht direkt in die Gleichung $W = F \cdot s$ eingesetzt werden, da F nicht konstant ist[1]. Die Spannarbeit kann man aber errechnen, wenn das Kraft-Weg-Diagramm betrachtet wird **(siehe Abb. 122.2)**:

  Im **Kraft-Weg-Diagramm** kann der Flächeninhalt unter dem Graphen als Energie interpretiert werden!

  Aus $A = \frac{a \cdot b}{2}$ (rechtwinkeliges Dreieck) errechnet sich für die Federenergie E_{Feder}:

  $$E_{Feder} = k \cdot \frac{x^2}{2}$$

  k … Federkonstante, $[k] = N/m$

  x … Dehnung, $[x] = m$

Abb. 122.4

Beispiel 5.5

Pu˜ erfeder eines Eisenbahnwaggons:

Wie stark muss die Feder ausgelegt werden, damit nach dem Zusammendrücken (Federweg 20 cm) eine Energie von 20 kJ gespeichert ist? Die Federkonstante k ist zu errechnen!

$$E_{Feder} = k \cdot \frac{x^2}{2} \Rightarrow k = \frac{2 \cdot E}{x^2} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ J}}{(0{,}2\text{m})^2} = 1 \frac{\text{MN}}{\text{m}} = \mathbf{10 \frac{kN}{cm}}$$

[1] Um einen Gegenstand um die Strecke x zu dehnen, muss die Kraft $F = k \cdot x$ ausgeübt werden – Hooke´sches Federgesetz.

- **Weitere Energiearten**

  Energiearten gibt es viele. Zur Erzeugung der sogenannten **Sekundärenergien** (z.B. Wärmeenergie für Heizzwecke, Elektrizität) sind die **Primärenergien** wichtig, z.B.:
  - Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Erdöl (chemische Energie)
  - Windenergie und Wasserkraft
  - Sonnenenergie (Licht, Wärme)
  - Kernenergie (Kernspaltung von Uran)
  - Erdwärme (Geothermie)

Merk & Würdig

Potenzielle Energie

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

Kinetische Energie (Bewegungsenergie):

$$E_{kin} = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

Federenergie:

$$E_{Feder} = k \cdot \frac{x^2}{2}$$

E … Energie, $[E] = J$
h … Höhe, $[h] = m$
g … Fallbeschleunigung, $g = 9{,}81\ m/s^2$
k … Federkonstante, $[k] = N/m$
v … Endgeschwindigkeit, $[v] = m/s$
m … Masse, $[m] = kg$
x … Federweg, $[x] = m$

Beispiele für typische Werte von Energie in Joule	
Chemische Bindung; Seh- und Hörschwelle	10^{-20}
Kernfusion H zu He, pro Atom; Höhenstrahlung	10^{-10}
Herzschrittmacher	1
40-W-Lampe bei 5 Minuten Brenndauer	10^4
Kinetische Energie eines Autos (100 km/h)	10^6
Durchschnittsenergieverbrauch eines Menschen pro Woche	10^8
Abschuss einer Saturn-Rakete	10^{12}
Explosion einer Wasserstoffbombe	10^{18}
Weltenergiebedarf pro Jahr	10^{22}
Sternexplosion	10^{50}

Tabelle 123.1

Thema & Gesellschaft

Hier hast du Argumente, um mitzureden. Denn es geht um ein Thema, das unsere ganz persönliche und auch gesellschaftliche Verantwortung betrifft:

Der **quadratische Zusammenhang** zwischen Geschwindigkeit und Energie ist von besonderer Bedeutung. Verdoppelung der Geschwindigkeit bedeutet viermal so viel Energie!

Dies hat große Bedeutung im Alltag:

- Will man eine hohe Geschwindigkeit weiter erhöhen, ist ein größerer Arbeitsaufwand notwendig, als für dieselbe Geschwindigkeitsänderung bei niedrigem Tempo[1]. Dies bedeutet höheren Verbrauch beim Beschleunigen! Das heißt: **Sprit sparen** durch **„voraussehendes Fahren"**; kein „Stop-and-go"-Fahren!
- Bei Bremsvorgängen nimmt der **Bremsweg** mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu!
- Hohes Tempo hat bei einem Unfall schlimme Auswirkungen!

Abb. 123.1

[1] Energie zum Beschleunigung von v_1 auf v_2: $E_{kin} = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2)$

Übungen

Ü 5.7 Teste dich selbst! Wenn du 10 Punkte erreichst, dann weißt du über Energie, aber auch über gesellschaftliche Themen zu diesem Begri˜ gut Bescheid!

a) Welche Sätze beschreiben den Zusammenhang zwischen mechanischer Arbeit und Energie richtig?

- ☐ Energie geht bei der Arbeit verloren.
- ☐ Energie ist Leben!
- ☐ Energie wird bei der Arbeit umgewandelt.
- ☐ Energie hat ein Mensch, der viel arbeitet.

b) Schätze ab! Welche Energie ist notwendig, um mit einem Heißluftballon (423 kg Gesamtmasse) eine Höhe von 90 m zu erreichen?

☐ 40 kJ ☐ 0,4 MJ ☐ 400 kJ ☐ 40 000J

c) Welche Aussagen über Diagramme sind korrekt?

- ☐ Der Bereich unter einem Graphen wird immer in der SI-Einheit m^2 angegeben, weil es sich um eine Fläche handelt.
- ☐ Die Fläche unter dem Graphen kann die Einheit Joule haben.
- ☐ Im Kraft-Weg-Diagramm ist der Flächeninhalt unter dem Graphen die verrichtete Arbeit.
- ☐ Im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm ist der Flächeninhalt unter dem Graphen der zurückgelegte Weg.
- ☐ Eine Fläche hat in einem Diagramm keine große Bedeutung, da die Aufgabe eines Diagramms die Darstellung einer Funktion ist.

d) In einem Gespräch fällt der Begriff „defensives Fahren“. Welche Argumente kannst du aus naturwissenschaftlicher Sicht in dieser Diskussion empfehlen?

- ☐ Man spart Energie, da man beim defensiven Fahren nicht bei jeder Kreuzung aus dem Stillstand beschleunigen muss.
- ☐ Defensives Fahren ist gefährlich, da man dadurch andere Fahrer zu aggressivem Überholen provoziert.
- ☐ Würden alle defensiv fahren, dann wären auf vielen Straßen Staus.
- ☐ Unfälle von defensiven Fahrern und Fahrerinnen sind seltener und verursachen weniger Schaden.
- ☐ Defensive Fahrer können nicht einparken.

e) Auf Seite 123 werden Primärenergien vorgestellt. Welche dieser Energien entstammen ihrem Ursprung nach von der Sonnenenergie?

☐ Kernspaltung ☐ Windenergie
☐ Braunkohle ☐ Erdwärme (Geothermie)

Mehrfachantworten möglich.

In den folgenden Übungen kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Energie Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse abschätzen und errechnen. Vergleiche die Werte mit Tabelle 123.1!

Ü 5.8 **Wie viele Stockwerke hat euer Schulgebäude?** Angenommen, es hat mehr als eines: Wie viel Energie benötigst du, um vom Erdgeschoß aus eine Klasse im zweiten Stock deines Schulgebäudes zu erreichen? Schätze alle benötigten Größen selbst ab!

Ü 5.9 Eine **Kaplanturbine** (Abb. 124.1) wird bei einem Gefälle von 20 m zur Energiegewinnung in einem Laufkraftwerk verwendet. Welche Wassermenge muss pro Minute die Turbine durchlaufen, um in dieser Zeit eine Energie von 0,8 MJ zu erzeugen?

Ü 5.10 *A **weight-lifter** is lifting a mass of 200 kg up to a height of 2 meters. Calculate the potential energy in Vienna ($g = 9{,}80665\ m/s^2$) and near the North Pole ($g = 9{,}83204\ m/s^2$).*

Ü 5.11 Die Ampel wird Grün. Lisa, eine Lkw-Fahrerin, und Leo, ein Fahrradfahrer „geben Gas“ und beschleunigen auf 30 km/h. Vergleiche die beiden kinetischen Energien von Lisa (Masse Lisa + Lkw: 20 t) und Leo (Masse Leo + Fahrrad: 70 kg)

Ü 5.12 Corina, 55 kg, bremst ihr **Motorrad** (BMW R 1100S), 229 kg, von 130 km/h vollständig ab. Welche kinetische Energie müssen die Bremsscheiben (Abb. 124.2) „vernichten“?

Ü 5.13 Laurents trainiert in der **Kraftkammer** mit einem Expander. 30-mal dehnt er diesen aus dem entspannten Zustand um jeweils 50 cm aus. Welche Energie ist dazu nötig, wenn die Federkonstante 8 N/cm beträgt?

Abb. 124.1 *Kaplanturbine, 6,8 m Durchmesser, für geringe Fallhöhen (Laufkraftwerke)*

Abb. 124.2 ***Scheibenbremse:*** *Kinetische Energie wird beim Bremsen in Wärme umgewandelt.*

5.2 Leistung und Wirkungsgrad

5.2.1 Die Leistung *(power)*

Auf einer Baustelle werden zwei Lastenaufzüge eingesetzt. Der erste „plagt sich" und hebt in einer Zeit von 20 s Baumaterial mit 100 kg vom Boden in den dritten Stock. Der zweite braucht für die **gleiche Arbeit** nur die halbe Zeit. Beide haben also gleiche **Hubarbeit** geleistet. Aber haben beide Aufzüge auch dasselbe „**geleistet**"?

Oft ist es nicht nur von Belang, ob dasselbe verrichtet wurde, sondern es ist auch wichtig, wie viel Zeit dafür benötigt wurde. Je schneller eine Arbeit erledigt ist, umso „besser", umso größer ist auch die Leistung.

- **Mechanische Leistung:**

Unter **mechanischer Leistung P** versteht man die Arbeit, die pro Zeit verrichtet wird. Voraussetzung ist dabei, dass die Arbeit W während dieser Zeit t konstant bleibt. Dann gilt:

Merk & Würdig

$P = \frac{W}{t}$, $[P] = J/s = W$ … (Watt)[1]

W … konstante Arbeit, $[W] = J$ t … für die Arbeit W benötigte Zeit, $[t] = s$

Ergänzung & Ausblick

Kilowattstunde *(kWh)*

Mit der Einheit Watt *(W = J/s)* ergeben sich auch andere Versionen für die **SI-Einheiten der Energie:**

$J = Ws$ **1 kWh** $= 1000 \cdot W \cdot 3600 s =$ $\mathbf{3{,}6 \cdot 10^6 J}$

Alte Einheit für die Leistung *P*:

1 PS (Pferdestärke) = **735,5 W**

1PS~3/4 kW

Beispiel 5.6

Eine **Trinkwasserpumpe** fördert 60 l/min über eine Höhe von 30 m. Berechne die Pumpleistung.

Die Pumpe hebt 60 kg in einer Minute 30 m hoch: $W = m \cdot g \cdot h$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t} = \frac{60 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2 \cdot 30 \text{ m}}{60 \text{ s}} = \mathbf{294 \text{ W}}$$

- **Leistung bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung**

Beschleunigt ein Fahrzeug, dann benötigt es für dieselbe Beschleunigung bei geringen Geschwindigkeiten weniger Leistung als bei hohen Geschwindigkeiten.
Für eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung a ergibt sich eine Leistung P, die von der Geschwindigkeit ($v = a \cdot t$) und damit auch von der Zeit abhängt:

Merk & Würdig

$P = m \cdot a \cdot v = F \cdot v$

m … Masse, $[m] = kg$ a … konst. Beschleunigung, $[a] = m/s^2$

v … Geschwindigkeit, $[v] = m/s$ F … konst. Kraft, $[F] = N$

[1] JAMES WATT (1736 Greenock-on-Clyde – 1819 Heathfield), schottischer Ingenieur, Erfinder, verbesserte 1765 die Dampfmaschine, sodass sie industriell einsetzbar und leistungsfähig wurde. Er löste damit die **industrielle Revolution** aus.

HORSE-POWER LOCOMOTIVE.

Abb. 125.1 ***Horse-Power Locomotive**, USA Mitte 19. Jh.*

Abb. 125.2 *JAMES WATT*

Beispiele von Leistungen	
Schallleistung beim Sprechen	10^{-5} W
Herzleistung des Menschen	1 W
Glühlampe, Wärmeausstrahlung einer Person	10^2 W
Kochplatte, Waschmaschine	10^3 W
Automotor	10^5 W
Flugzeug (Airbus), Donaukraftwerk	10^8 W
Golfstrom	10^{10} W
Sonne	10^{26} W

Tabelle 125.1

Abb. 126.1 **Beschleunigung eines Kfz** *(m = 2 t; a = 2 m/s²). Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Leistung von der Geschwindigkeit bei einer* ***gleichmäßig beschleunigten Bewegung****.*

Graÿsche Interpretation: Im Diagramm **(Abb 126.1)** ist der Zusammenhang dargestellt. Um z. B. bei einem Überholvorgang mit 100 km/h noch mit 2 m/s² beschleunigen zu können, muss das Fahrzeug zumindest eine Leistung von 200 kW aufweisen (dabei sind Luftwiderstand und Rollreibung nicht eingerechnet!).

Beispiel 5.7

Ursula fährt mit dem Fahrrad

Sie schafft kurzzeitig eine Leistung von 250 W! (Masse inkl. Fahrrad: 60 kg)
Die Ampel wird Grün und Ursula startet mit „voller Power".
Wie hoch ist Ursulas Beschleunigung gleich nach dem Wegfahren bei 5 km/h und kurz danach bei 15 km/h?

$v_1 = 1{,}389\,\text{m/s},\ v_2 = 4{,}167\,\text{m/s}$

$$P = m \cdot a \cdot v \Rightarrow a_1 = \frac{P}{m \cdot v_1} = \frac{250\,\text{W}}{60\,\text{kg} \cdot 1{,}389\,\text{m/s}} = \mathbf{3{,}0\ m/s^2}$$

$$a_2 = \frac{P}{m \cdot v_2} = \frac{250\,\text{W}}{60\,\text{kg} \cdot 4{,}167\,\text{m/s}} = \mathbf{1{,}0\ m/s^2}$$

Man erkennt, dass bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit mit konstanter Leistung die Beschleunigung sinkt.

Abb. 126.2 **„Innenleben" von Heizdrähten;** *Einsatz in Bügeleisen, Waschmaschinen …*

- **Elektrische Leistung:**

  Der durch den elektrischen Widerstand fließende Strom führt zu einer Erwärmung des Leiters (**Joule´sche Wärme**).

Merk & Würdig

Für die **elektrische Leistung *P***, also die Energie, die pro Zeit abgestrahlt wird, erhält man:

$$P = U \cdot I$$

Setzt man das Ohm´sche Gesetz (siehe Seite 35) in die Leistungsformel ein, ergibt sich auch:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$$

P … elektrische Leistung, *[P] = V · A = W (Watt)*

I … Stromstärke, *[I] = A*

R … elektrischer Widerstand, *[R] = Ω*

U … Spannung, *[U] = V*

Energie in Form von **Wärme** wird an einem Ohm´schen Widerstand abgestrahlt und deshalb muss im selben Maß elektrische Energie zugeführt werden.

Obige Formeln dienen zur Berechnung

- der **Nennleistung**, in Gleichstrom als auch in Wechselstromkreisen. (Am Leistungsschild von Elektrogeräten wird diese Leistung als **Nennleistung** für Ohm´sche Widerstände von Geräten wie Lötkolben, Glühlampen, Heizstrahlern angeschrieben.)
- von **Energieverlusten** in Versorgungsleitungen.

Beispiel 5.8

Heizstrahler

Um einen Wohnraum zu heizen, soll ein elektrischer Heizstrahler mit einer Nennleistung von 1,8 kW bei 230 V Netzspannung betrieben werden.

a) Welche Sicherung muss mindestens vorgesehen werden? (Fließt beispielsweise auf Grund eines fehlerhaften Verbrauchers ein zu großer Strom, kann durch überhitzte Leitungen Feuergefahr bestehen. Sicherungen oder Sicherungsautomaten sollten in diesem Fall den Stromkreis unterbrechen.)

b) Welche Energie wird dabei in 30 Minuten verbraucht?

a) $P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{1\,800\text{ W}}{230\text{ V}} = \mathbf{7{,}8\text{ A}}$

Eine 10-A-Sicherung wird ausreichen.

b) $P = \frac{W}{t} \Rightarrow W = P \cdot t = 1\,800\text{ W} \cdot 30 \cdot 60\text{ s} = \mathbf{3{,}24 \cdot 10^6\text{ J}}$

$3{,}24 \cdot 10^6$ J = **0,9 kWh** (Umrechnungsfaktor: $3{,}6 \cdot 10^6$) werden verbraucht.

Merk & Würdig

Mechanische Leistung

$$P = \frac{W}{t} \qquad [P] = J/s = W$$

Leistung bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung:

$$P = m \cdot a \cdot v = F \cdot v$$

Elektrische Leistung

$$P = U \cdot I$$

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$$

m … Masse, $[m] = kg$
v … Geschwindigkeit, $[v] = m/s$
W … Arbeit, $[W] = J$
R … elektrischer Widerstand, $[R] = \Omega$
U … Spannung, $[U] = V$
a … Beschleunigung, $[a] = m/s^2$
F … Kraft, $[F] = N$,
t … für die Arbeit W benötigte Zeit, $[t] = s$
I … Stromstärke, $[I] = A$

Thema & Gesellschaft

Tipp: Fahrradfahren!

Im Vergleich verschiedener Fortbewegungsmittel

- benötigen Radfahrer die **geringste Leistung**,
- benötigen sie **keine teuren Treibsto˜ e**,
- produzieren sie **kein CO_2**.

Abb. 127.1 *Beim Wegfahren von einer Kreuzung bei Grün haben* ***Radfahrer tolle Beschleunigungswerte****! Ursache: Die Gesamtmasse ist klein (siehe* ***Ü 5.15****).*

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Leistung Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 5.14 Bei den **Niagarafällen** stürzen etwa 6 000 m³ Wasser pro Sekunde ca. 50 m in die Tiefe. Welche Leistung haben die Niagarafälle?

Ü 5.15 **Es wird Grün an der Kreuzung.** Wer beschleunigt besser, ein 40-Tonnen-Lkw mit einer Leistung von 285 kW oder eine Radfahrerin (Gesamtgewicht 50 kg) mit 250 W Leistung? Berechne die Beschleunigung bei 10 km/h. Welche Aspekte werden in diesem Beispiel vernachlässigt?

Ü 5.16 Bei einem **Wasserkraftwerk** beträgt die Fallhöhe des Wassers, das die Turbinen antreibt, 70 m. Wie viel Liter Wasser müssen pro Minute zufließen, wenn das Kraftwerk eine Leistung von 150 kW haben soll? (Ohne Reibungsverluste)

Übungen

Ü 5.17 **Überholvorgang:** Ein Auto (1 200 kg) beschleunigt beim Überholen von 100 km/h kurzfristig in 5 s auf 140 km/h. Welche durchschnittliche Leistung ist dazu nötig? (Zusätzlich wirken noch die Kräfte durch Luftwiderstand und Rollreibung, die hier vernachlässigt werden sollen.)

Tipp: Berechne die Leistungen bei den zwei vorgegebenen Geschwindigkeiten und bilde das arithmetische Mittel.

Ü 5.18 Berechne **a)** die Stromstärke beim Betrieb eines Bügeleisens mit der Nennleistung von 2 000 W bei 230 V.

b) Welche Energie (in Joule bzw. kWh) wird dabei während einer Einschaltdauer von 12 Minuten verbraucht?

Ü 5.19 **Ein Stromkreis** wird gleichzeitig von einer Waschmaschine (2 000 W), einem Staubsauger (1 200 W), einer Lampe (100 W) und einem Geschirrspüler (1 200 W) belastet. Da schaltet sich noch der Kühlschrank (150 W) ein. Wird die Sicherung (16 A) diese zusätzliche Belastung aushalten? (U = 230 V)

Tipp: Leistungen dürfen addiert werden!

Ü 5.20 **Überlastung:** Ein Widerstand mit 10 kΩ hat eine maximale Belastbarkeit von einem Watt. Welche Spannung kann an den Widerstand angelegt werden, ohne ihn zu überlasten?

Ü 5.21 ***An electric lamp is marked 100 W.*** *How many joules (and how many kWh) of electrical energy are transformed into heat and light during each hour of work?*

Abb. 128.1

5.2.2 Der Wirkungsgrad *(efficiency)*

Vor allem in Zeiten schrumpfender Energieressourcen ist es ein wichtiges Thema: Die **Energieumwandlung** ist auch **effizient** zu verwirklichen. Bei zahlreichen Umwandlungsprozessen ist Reibung im Spiel. Diese führt oft zu nicht weiter technisch nutzbarer Wärmeproduktion (**Verlustwärme**).

Zur Angabe der Güte eines Umwandlungsprozesses dient der **Wirkungsgrad** η (sprich: „eta“). Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der abgegebenen Nutzenergie zur eingesetzten Energie. Analog ist der Wirkungsgrad über die Leistung definiert:

$$\eta = \frac{E_{Nutz}}{E_{zu}} \text{ oder } \eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{zu}}, [\eta] = 1$$

Die Verlustleistung P_{Verl} ist dabei die Differenz von zugeführter Leistung P_{zu} und Nutzleistung P_{Nutz}: $P_{Verl} = P_{zu} - P_{Nutz}$

Hinweis: Oft wird der Wert des Wirkungsgrades mit 100 multipliziert und in Prozent angegeben.

Die Angabe auf Elektrogeräten (z. B.: 100 W bei Glühlampen) oder bei Kraftwerken (z. B.: 500 MW-Kraftwerk) bezieht sich üblicherweise auf die **zugeführte Leistung**. Bei Elektrogeräten spricht man auch von **Anschlussleistung**.

Da eine vollständige Umwandlung von Wärmeenergie (Innerer Energie) in mechanische Energie nicht möglich ist, gilt:

$$\eta < 1$$

Werden zwei „Maschinen“ hintereinander („seriell“) betrieben, dann ist der Gesamtwirkungsgrad das Produkt der Teilwirkungsgrade:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$$

Abb. 128.2 *Der Gesamtwirkungsgrad ist bei dieser Anlage gleich dem Produkt der Wirkungsgrade ihrer Teile.*

Beispiele für Wirkungsgrad in %	
Generator; Elektromotor (hoher Güteklasse); Transformator	99
Turbine in Wasserkraftwerk	95
Batterie, Autogetriebe	90
Gesamtwirkungsgrad von Kraftwerk mit Kraft-Wärmeauskopplung	85
Turbine in Wärmekraftwerk	45
Verbrennungsmotoren Kfz	25–30
Energiesparlampe, Solarzellen	20
Energieumsatz Mensch: Kohlehydrate – mechanische Arbeit	10
Glühlampe	3–5
Photosynthese der Pflanzen	1

Tabelle 128.1

Beispiel 5.9

Ein Kranmotor
hebt eine Last (2 Tonnen) in 15 s auf eine Höhe von 125 m. Welche Anschlussleistung ist vorzusehen, wenn der Wirkungsgrad 85 % ausmacht?

Unter Anschlussleistung versteht man P_{zu}.
Die Nutzleistung P_{Nutz} errechnet sich über die Hubarbeit $W = m \cdot g \cdot h$ pro Zeit:

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{zu}} \Rightarrow P_{zu} = \frac{P_{Nutz}}{\eta} = \frac{\frac{m \cdot g \cdot h}{t}}{\eta} = \frac{2\,000\text{ kg} \cdot 9{,}81\text{ m/s}^2 \cdot 125\text{ m}}{0{,}85 \cdot 15\text{ s}} = \mathbf{192\text{ kW}}$$

Beim Netzanschluss eines solch starken Motors ist allerdings zu bedenken, dass die Einschaltleistung kurzfristig weit größer ist!

Merk & Würdig

Wirkungsgrad ˜

˜ = $\frac{E_{Nutz}}{E_{zu}}$ oder ˜ = $\frac{P_{Nutz}}{P_{zu}}$, ˜ < 1

$[\eta] = 1$

Hinweis: Oft wird der Wert des Wirkungsgrades mit 100 multipliziert und in Prozent angegeben.

Verlustleistung P_{Verl}

$P_{Verl} = P_{zu} - P_{Nutz}$

Serielle Anordnung zweier Maschinen mit Wirkungsgraden von η_1 bzw. η_2; Gesamtwirkungsgrad η:

˜ = ˜$_1$ · ˜$_2$

E_{Nutz} … Nutzenergie
E_{zu} … zugeführte Energie

P_{Nutz} … Nutzleistung
P_{zu} … zugeführte Leistung

Abb. 129.1 *Anlagenaufbau im Windpark Üfersen, BRD*

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zu einem Thema mit aktueller gesellschaftlicher Dimension Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 5.22 **Torantrieb:** Die vom Elektromotor aufgenommene mittlere Leistung liegt bei 1,5 kW. Der Motor zieht das Tor gegen eine Reibungskraft von 2 800 N über eine Strecke von 4 m in einer Zeit von 11 s. Wie groß ist der Wirkungsgrad der Anlage?

Ü 5.23 **Notstromaggregat:** Ein Dieselmotor mit einem Wirkungsgrad von 28 % treibt einen Generator mit einem Wirkungsgrad von 88 % an. Wie groß ist die erzeugte Leistung, wenn dem Dieselmotor pro Stunde 20 kWh aus dem Verbrennungsprozess zur Verfügung stehen (das entspricht 2 Liter Dieselöl)?

Ü 5.24 Eine **Schmutzwasser-Pumpe** mit einer Anschlussleistung von 2kW (Wirkungsgrad 89 %) soll Wasser auf eine Höhe von 15 m pumpen. Wie viel Liter Wasser können pro Minute hochgehoben werden?

Ü 5.25 **Drei-Liter-Auto:** Ein „Sparauto“ mit 45 kW hat einen Gesamtwirkungsgrad von 30 %. Ein Teil der Verluste geht in Form von Wärme im Motor „verloren“ (Getriebe und Antrieb haben etwa 80 % Wirkungsgrad).

a) Welche Leistung hätte das Fahrzeug ohne Verluste?

b) Welchen Wirkungsgrad hat der Motor?

c) Mit welchem Gesamtwirkungsgrad kann man im Winter rechnen, wenn ein Teil der „Verlustwärme“ (2 kW) zur Fahrzeugbeheizung verfügbar sein muss?

Tipp: Berechne die Verlustwärme.

5.3 Kraftstoß und Impuls *(impulse and momentum)*

Abb. 130.4

Beim Sprint-Start bewirkt eine Kraft F, die eine Zeit Δt lang wirkt, eine Geschwindigkeitsänderung. Dabei wird eine frei bewegliche Masse m beschleunigt:

F = m · °v/°t (Dynamisches Grundgesetz)

Formt man um, ergibt sich: **F · °t = m · °v**

- $F \cdot \Delta t$ nennt man **Kraftstoß** (*impulse*) und
- $m \cdot \Delta v = \Delta p$ heißt **Impulsänderung**[1].

Daraus kann man wichtige Begriffe herleiten:

- **Rückstoß:** Nach dem 3. Newton' schen Axiom wirkt eine gleich große entgegengesetzt wirkende Kraft zur Kraft F. Diese Gegenkraft nennt man **Rückstoß**. Siehe Übungsbeispiel **Ü 5.27** und **Abb. 130.3**.
- **Impuls p** (*momentum*): Um einen Körper mit der Masse m aus der Ruhe auf die Geschwindigkeit v zu beschleunigen, muss insgesamt ein Kraftstoß $\boldsymbol{p = m \cdot v}$ auf ihn gewirkt haben. Diesen Ausdruck nennt man **Impuls** $\boldsymbol{p}$.

  So wie die **kinetische Energie** ist auch der **Impuls** eine **Bewegungsgröße**. Beide Größen sind nur von Eigenschaften des bewegten Körpers abhängig.
- **Impuls und Kraftstoß**
  - besitzen **dieselbe Einheit** $[p] = kg \cdot m/s = N \cdot s$
  - unterscheiden sich darin, dass der Kraftstoß nur dann wirkt, wenn eine Kraft wirkt. Im Gegensatz dazu ist der Impuls auch dann vorhanden, wenn sich der Körper kräftefrei bewegt.
  - sind **vektorielle Größen**. Impuls p und Geschwindigkeit v haben **gleiche Richtung** und Orientierung. Analoges gilt für Kraft F und Geschwindigkeitsänderung Δv.

Abb. 130.1

Merk & Würdig

Kraftstoß: F · °t = m · °v

Impuls: $\boldsymbol{p = m \cdot v}$

[p] = [F] · [Δt] = Ns = [m] · [Δv] = kg · m/s

Der Kraftstoß F · °t bewirkt eine Impulsänderung °p = m · °v .

Kraft F

Kraftstoß Δp

t_1 t_2 Zeit t

Abb. 130.2 *Die Impulsänderung Δp entspricht dem Flächeninhalt unter dem Graphen im* ***Kraft-Zeit-Diagramm****. Dies gilt auch für den Fall, dass die Kraft nicht konstant ist, wie in der Abbildung.*

Beispiel 5.10

Bowlingkugel

Wie lang muss eine Kraft von 50 N auf eine Bowlingkugel (m = 1,5 kg) wirken, damit sie auf eine Geschwindigkeit von 30 km/h beschleunigt wird?

$$F \cdot \Delta t = \Delta p \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta p}{F} = \frac{1{,}5\ \text{kg} \cdot 8{,}33\ \text{m/s}}{50\ \text{N}} = \mathbf{0{,}25\ s}$$

Abb. 130.3 *Rückstoß*

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen durchführst, dann kannst du Ergebnisse zu typischen Fragestellungen aus Physik und Technik errechnen:

Ü 5.26 **Rückstoß eines Gewehrs:** Berechne, mit welcher Kraft das Gewehr auf die Schulter eines Schützen drückt. Masse des Projektils: 10 g, Geschossgeschwindigkeit: 850 m/s, Dauer des Geschossaustritts aus dem Gewehrlauf: 7 ms

Ü 5.27 ***Slapstick:*** *A man stands still on a boat* ***(Fig. 130.3)****. He is shooting for wild ducks. The total mass is 80 kg. He is firing a mass of 10 g at 400 m/s. What is the velocity of the man (making his slapstick-jump into cold water)?*

[1] Der Zusammenhang $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$ ist nur dann richtig, wenn sich die Kraft F und die Masse m im betrachteten Zeitintervall Δt nicht ändert, siehe auch **Abb. 130.2.**

5.4 Erhaltungssätze *(laws of conservation)*

In den Naturwissenschaften gibt es Größen, die sich während eines Vorganges nicht ändern. Derartige Größen nennt man **Erhaltungsgrößen**.

Zur Erforschung von Erhaltungsgrößen betrachtet man Vorgänge in einem **abgeschlossenem System**. Dieses hat keine Verbindung mit der „Außenwelt".

Derartige Systeme können beispielsweise:

- ein frei fallender Körper während des freien Falls oder
- sehr große Systeme (wie z. B. das Universum)

sein.

Experimentell sind abgeschlossene Systeme oft nur schwer realisierbar. Eine generelle Abgrenzung scheitert in der Praxis an technischen Problemen oder am zu großen Aufwand.

5.4.1 Der Energieerhaltungssatz (EES) *(the principle of conservation of energy)*

Die Energie ist eine Erhaltungsgröße. Man kann daher einen der wichtigsten Erhaltungssätze und Prinzipien formulieren:

In einem abgeschlossenem System ändert sich der Betrag der Gesamtenergie nicht.

In mathematischer Schreibweise: $\sum E_i = const$

Betrachtet man nur die potenzielle Energie E_{pot} und die kinetische Energie E_{kin}, wie es in mechanischen Systemen üblich ist, dann schreibt man:

$$E_{kin} + E_{pot} = const$$

Beispiel 5.11

Energieerhaltungssatz beim freien Fall

Galilei experimentierte, so wie in Abb. 131.2 gezeigt:

Er ließ einen Stein aus einer Höhe $H = 45$ m fallen. Welche Geschwindigkeit hatte der Stein

a) beim Aufprall

b) in einer beliebigen Position *h*?

Wir wollen den frei fallenden Körper als abgeschlossenes System betrachten, da der fallende Körper während der Bewegung mit der Umgebung nicht in Wechselwirkung tritt. Dabei wird der Luftwiderstand vernachlässigt.

Die Energie weiter unten (in einer beliebigen Position *h*) muss laut Energieerhaltungssatz so groß wie am Anfang (oben) sein und setzt sich aus E_{kin} und E_{pot} zusammen:

a) $\overbrace{E_{kinO} + E_{potO}}^{oben} = \overbrace{E_{kinU} + E_{potU}}^{unten}$;

oben ist $E_{kinO} = 0$; ganz unten ist $E_{potU} = 0$; daher gilt:

$$E_{potO} = E_{kinU} \Rightarrow m \cdot g \cdot H = m\frac{v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{2gH}$$

(Diese Beziehung ist schon von der gleichmäßig beschleunigten Bewegung bekannt und ergibt sich, wie man sieht, auch aus dem EES.)

Für die Aufprallgeschwindigkeit *v* ergibt sich somit:

$$v = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 \cdot 45\ \text{m}} = \mathbf{29{,}7\ m/s}$$

b) In einer beliebigen Position h gilt:

oben ist $E_{kinO} = 0$; weiter unten ist $E_{potU} = m \cdot g \cdot (H - h)$; daher gilt:

$$m \cdot g \cdot H = m\frac{v^2}{2} + mg\,(H - h) \Rightarrow \mathbf{v = \sqrt{2g(H - h)}}$$

Die Gesamtenergie ändert sich während des freien Falls nicht; sie ist zu jedem Zeitpunkt gleich groß, nämlich $E_{ges} = m \cdot g \cdot H$

Abb. 131.1 *In einem gespannten Bogen wird die verrichtete* ***Spannarbeit*** *gespeichert (****Federenergie****) und beim Abschießen in* ***kinetische Energie*** *des Pfeils umgewandelt.*

Bei der Aufwärtsbewegung des Pfeils wird ***kinetische Energie*** *in* ***potenzielle Energie*** *umgewandelt, beim Abwärtsflug umgekehrt.*

Merk & Würdig

Energieerhaltungssatz der Mechanik (EES) :

In abgeschlossenen Systemen bleibt die Gesamtenergie konstant.

$$E_{kin} + E_{pot} = const$$

$$\sum E_i = E_{Ges} = const$$

Abb. 131.2 *Galileis Fallexperiment*

Abb. 132.1 *„Gar manchen Tag haben Meister darüber beratschlagt, wie man ein Rad machen könne, das sich von selbst dreht. Hier ist eines, das man aus einer ungeraden Anzahl von Hämmern oder mit Quecksilber machen kann."*
So lapidar beschreibt VILLARD DE HONNECOURT 1235 das erste ***Perpetuum mobile*** *des Abendlandes.*

Merk & Würdig

Erweiterter Energieerhaltungssatz der Mechanik:

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} + U = const$$

E_i … Teilenergien, $[E_i] = J$

U … Innere Energie (Wärme), $[U] = J$

Abwärme: Wärme geht nicht verloren, sie ist aber nicht immer nutzbar!

Abb. 132.2

Abb. 132.3 *ROBERT MAYER*

NEANDER AUS DEM TAL

Abb. 132.4

Potenzielle und kinetische Energie lassen sich ineinander umwandeln.

Der Energieerhaltungssatz wurde erstmals in der Mitte des 19. Jahrhunderts von ROBERT MAYER[1] formuliert. Bis dahin gab es viele gescheiterte Versuche, ein sogenanntes Perpetuum mobile zu konstruieren. Unter einem **Perpetuum mobile 1. Art** versteht man eine Maschine, die fortwährend mehr Arbeit verrichtet, als ihr Energie zugeführt wird **(siehe Abb. 132.1)**. Der Energieerhaltungssatz lässt ein Perpetuum mobile 1. Art **nicht zu**!

Erweiterung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik:

Der Energieerhaltungssatz gilt selbstverständlich nicht nur für mechanische Energiearten, sondern auch für Wärmeenergie. ROBERT MAYER zeigte auch, dass bei Vorgängen, die mit Reibung verbunden sind, Energie nicht einfach verschwindet. So wird beispielsweise bei einem Bremsvorgang E_{kin} in Wärme umgewandelt, die für uns leider nicht nutzbar ist. Man spricht dann von Abwärme.

Eine beispielsweise durch Reibung verursachte **Temperaturerhöhung** bewirkt eine Erhöhung der **Inneren Energie *U*** (*intrinsic energy*).

Der erweiterte Energieerhaltungssatz der Mechanik lautet:

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} + U = const$$

U … Innere Energie (Wärme)

Beispiel 5.12

Ein Tennisball

mit einer Masse von 59 g wird mit einer Geschwindigkeit von 30 m/s in einer Höhe von 2 m abgeschossen. In der Höhe von 50 cm über dem Boden verfängt er sich im Netz.

Welche Energie wird durch Luftwiderstand und Verformung „frei"?

$$\text{EES: } \overbrace{E_{pot1} + E_{kin1} + U_1}^{vorher} = \overbrace{E_{pot2} + E_{kin2} + U_2}^{nachher}$$

$$m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} + U_1 = m \cdot g \cdot h_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2} + U_2$$

Innere Energiedifferenz im abgebremsten Zustand:

$$U_2 - U_1 = m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} - m \cdot g \cdot h_2 - 0$$

Setzt man die Zahlenwerte ein, ergibt sich **°U = –27,4 J.** Das negative Vorzeichen bedeutet, dass dem System die Energie in Form von Wärme und Verformung „verloren" geht.

[1] ROBERT MAYER (1814 Heilbronn – 1878 Heilbronn), der deutsche Arzt und Physiker, formulierte als erster den Energieerhaltungssatz. Er schrieb: „Wenn Bewegung abnimmt und aufhört, so bildet sich ... namentlich also Wärme." Von Kritikern wurde sein Lehrsatz als „ein vollkommen unwissenschaftliches, allen klaren Ansichten über die Naturtätigkeit widersprechendes Paradoxon" heftig angegriffen. Er begann unter starken Depressionen zu leiden und musste in einem Sanatorium therapiert werden. Mittlerweile feierte das Energieprinzip einen wahren Siegeszug durch die Physik. Der Begriff **Energie** wurde in den 1850er-Jahren eingeführt.

Beispiel 5.13

Achterbahn:
Ein Waggon wird mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h in einer Höhe von 20 m ohne weiteren Antrieb, praktisch reibungslos, seinem Schicksal übergeben: „Freie Fahrt".

a) Welche Geschwindigkeit hat das Fahrzeug in einer Höhe von 5 m und

b) welche Höhe kann es maximal erreichen?

Rechnung mit EES: $\overbrace{\boldsymbol{E_{pot1} + E_{kin1}}}^{\text{vor dem Start}} = \overbrace{\boldsymbol{E_{pot2} + E_{kin2}}}^{\text{nach dem Start}};$

a) $m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} = m \cdot g \cdot h_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2}$

Division durch m und Umstellen auf v_2 ergibt:

$v_2 = \sqrt{(g \cdot h_1 - g \cdot h_2 + \frac{v_1^2}{2}) \cdot 2}$

$v_2 = \sqrt{[9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (20\text{ m} - 5\text{ m}) + \frac{(13{,}89\text{ m/s})^2}{2}] \cdot 2} = \mathbf{22{,}1\ m/s}$

In einer Höhe von 5 m hat das Fahrzeug eine Geschwindigkeit von **ca. 80 km/h.**

b) An der höchsten Stelle ist das Fahrzeug im Stillstand ($v_2 = 0$):

$m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} = m \cdot g \cdot h_2 + 0$

Division durch m und Umstellen auf h_2 ergibt:

$h_2 = (g \cdot h_1 + \frac{v_1^2}{2}) \cdot \frac{1}{g} = (9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20\text{ m} + \frac{(13{,}89\text{ m/s})^2}{2}) \cdot \frac{1}{9{,}81\text{ m/s}^2} = \mathbf{29{,}8\ m}$

Das Fahrzeug erreicht **fast 30 m** Höhe.

Abb. 133.1 *„Physikalischer Nervenkitzel"*

Ergänzung & Ausblick

Energieerhaltungssatz – und was steckt dahinter?

- Ein Grundprinzip der Naturwissenschaft lautet:
  Experimente sollen wiederholbar sein.
- Ein Naturgesetz soll immer (und überall) Gültigkeit haben. So soll z. B. das Fallgesetz in seiner Gültigkeit nicht gerade auf die Zeit der Physikstunde von 8:00 Uhr bis 8:50 Uhr beschränkt sein. Dies wird als **zeitliche Invarianz** bezeichnet.
- Wären beispielsweise Kräfte heute kleiner und morgen größer, würde man eben genau daraus Energie gewinnen können, was offensichtlich, wie die Experimente zeigen, unmöglich ist, und zur Formulierung des Energieerhaltungsprinzips führte.
- Die mathematischen Grundlagen der Erhaltungssätze formulierte EMMY NOETHER, siehe S. 141.

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen löst, kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Energieerhaltungssatz Lösungsansätze aufstellen, Ergebnisse errechnen und wichtige Fragen zu einem der grundlegendsten Prinzipien beantworten. Alle Beispiele sind unter Anwendung des EES zu rechnen!

Ü 5.28 Eine **Fahrradfahrerin** fährt mit 30 km/h auf eine Steigung zu. Die Fahrradkette springt heraus. Welche Höhendifferenz kann sie noch überwinden? Die Reibung sei vernachlässigbar.

Ü 5.29 **Tarzan** schwingt mit seiner Liane aus einer Höhe von 5 m hinab. Welche Geschwindigkeit kann Tarzan maximal erreichen? (Mache eine Skizze und trage ein, an welcher Stelle die Energien jeweils maximal sind.)

Abb. 133.2

Übungen

Ü 5.30 **Pulverschneelawinen** können sehr große Geschwindigkeiten erreichen, weil sie oft auf einem Luftpolster fast reibungsfrei gleiten. Eine Lawine mit 10^7 kg Schnee stürzt von einem Berg in ein 500 m tiefer gelegenes Tal.

a) Mit welcher Geschwindigkeit erreicht die Lawine das Tal?

b) Vergleiche die erreichte kinetische Energie mit der Explosion einer Tonne TNT (dabei wird etwa $4 \cdot 10^9$ J frei).

Ü 5.31 **Hochschaubahn:** Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h in einer Höhe von 40 m ohne weiteren Antrieb los. Welche Geschwindigkeit hat das Fahrzeug in einer Höhe von 15 m und welche Höhe kann es maximal erreichen, wenn es praktisch reibungslos unterwegs ist?

Ü 5.32 ***Galileo*** *climbs the Leaning Tower of Pisa, which is 45 metres high. At what speed does the stone hit the ground, if Galileo drops it from a position 35 m above ground?*

Ü 5.33 Fülle den **Lückentext** aus:

In einem abgeschlossenen System wird nach außen keine ____________________ abgegeben oder ____________________. **Abwärme** ist keine „verlorengegangene" Energie, sondern eine nicht ____________________ Energie. Eine Maschine, die Arbeit verrichtet ohne Energie zu verbrauchen nennt man ____________________. Solch eine Maschine ist un____________________ .

5.4.2 Der Impulserhaltungssatz (IES) *(conservation of momentum)*

So wie die Energie bleibt auch der **Impuls *p*** in einem **abgeschlossenen System** konstant. Hier gilt für ein abgeschlossenes System, dass die Summe der von außen angreifenden Kräfte null ergeben muss.

- **Johnny der Skateboarder** macht am Board einen Schritt nach rückwärts. Das Brett bewegt sich schnell vorwärts. Der Gesamtimpuls bleibt ständig gleich! Der Impuls von Johnny ist nach der Rückwärtsbewegung entgegengesetzt gleich groß wie der des Bretts. Da das Brett aber weniger Masse hat, wird das Board schneller „wegfliegen" als Johnny. Johnny wird also bei seinem Sturz die Geschwindigkeit von zuvor in etwa beibehalten.

  Brett und Sportler bilden zusammen ein **abgeschlossenes System**. (Dies ist der Fall, wenn der Untergrund waagrecht verläuft und die Reibung vernachlässigbar ist.)

Abb. 134.2 *Die militärische Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnis gehört zu den dunklen Kapiteln der Menschheit.*

*Auf dem Bild ist der **Start einer A4**, der Vorläuferrakete der V2 im Jahr 1944 zu sehen. Der Einsatz der V2 führte zu großem Blutvergießen im Zweiten Weltkrieg.*

Abb. 134.1 ***Johnny*** *macht am Board eine Rückwärtsbewegung. Das Brett bewegt sich in entgegengesetzter Richtung nach vor.*

- **Raketenantrieb:** Der „Antrieb" des Tintenfischs und der Antrieb einer Rakete sind im Prinzip gleich. Die Rakete erhöht ihren Impuls im selben Maß, wie sich der Impuls der Treibgase durch deren Ausstoß erhöht, allerdings in die entgegengesetzte Richtung! Der Gesamtimpuls bleibt erhalten.

  Die Rakete kann auch im Vakuum unterwegs sein! Sie hat die Treibgase, die für den Rückstoß notwendig sind, in Form von Treibstoff an Bord. Die Rakete stößt sich von den Treibgasen ab!

- Der **Rückstoß** als Antrieb von Flugzeugen und Schiffen beruht auf dem Impulserhaltungssatz: Schiffsschrauben, Propeller und Düsen übertragen auf Wasser oder Luft einen Impuls; den gleich groß entgegengesetzten erhalten die Fahrzeuge.

- Da der Impuls ein Vektor ist, gilt der Impulserhaltungssatz **vektoriell**![1]
- **Mehrteilchensysteme:** Mit dem Impulserhaltungssatz können auch Systeme behandelt werden, die aus vielen Teilchen bestehen.

  Ob es das Treiben
  - glitzernder Lichter am Himmel bei einem Feuerwerk,
  - bewegter Gasmoleküle,
  - von Billardkugeln auf einem waagrechten Tisch oder
  - von zusammenstoßenden Elementarteilchen in Teilchenbeschleunigern (Stichwort CERN),

  ist, die Summe der Einzelimpulse ist dabei konstant.

Abb. 135.1 ***Feuerwerk:*** *Beispiel für IES bei vielen Teilchen*

Merk & Würdig

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \ldots = \vec{p}_{ges} = const.$$

‹ $\vec{p}_i = const.$ | im abgeschlossenen System (= Summe der äußeren Kräfte ist null)

Im abgeschlossenem System bleibt der Gesamtimpuls konstant.

Beispiel 5.13

Mars Global Surveyor

Im kräftefreien Raum soll die Flugbahn einer Raumsonde korrigiert werden. Dazu werden 0,2 kg Treibgas pro Sekunde durch eine Düse mit $2 \cdot 10^3$ m/s ausgestoßen.

Wie lang muss der Ausstoß anhalten, damit die Geschwindigkeit der Sonde um 120 m/s verändert wird?

Masse der Sonde: $m_s = 1{,}8 \cdot 10^3$ kg; Geschwindigkeit der Treibgase: $v_{Tr} = -2 \cdot 10^3$ m/s (Das negative Vorzeichen bedeutet, dass die Geschwindigkeit der Treibgase in die zum Raketenschub entgegen gesetzte Richtung orientiert ist.)

Geschwindigkeitsänderung der Sonde: $\Delta v_S = 120$ m/s

Vor dem Schub ist der Gesamtimpuls Treibgas – Sonde:

$p_{Tr} + p_S = 0$ (= const.)

Danach gilt daher ebenfalls: $\Delta m_{Tr} \cdot v_{Tr} + m_s \cdot \Delta v_s = 0$

Umstellen auf Δm_{Tr} ergibt:

$$\Delta m_{Tr} = \frac{-m_s \cdot \Delta v_s}{v_{Tr}} = \frac{-1{,}8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 120 \text{ m/s}}{2 \cdot 10^3 \text{ m/s}} = \mathbf{108\ kg}$$

Zeit für die Kurskorrektur:

$$t = \frac{108 \text{ kg}}{0{,}2 \text{ kg/s}} = 540 \text{ s} = \mathbf{9\ min}$$

Die Sonde verbraucht in **9 Minuten 108 kg** Treibgase.

Beachte: Die Sonde wird in dieser Zeit laufend pro Sekunde um 0,2 kg leichter. Dieser Einfluss wird hier vernachlässigt.

Abb. 135.2 *1997 erreichte* ***Mars Global Surveyor*** *den Mars.*

[1] In vielen Anwendungen ist nicht nur der Betrag des Impulses wichtig, sondern auch seine Richtung. Der Impulserhaltungssatz gilt für jede Komponente des Impulses: ‹ $p_x = const.$, ‹ $p_y = const.$, ‹ $p_z = const.$

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Impulserhaltungssatz nach einer Analyse Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen. Alle Beispiele sind unter Anwendung des Impulserhaltungssatzes zu rechnen!

Ü 5.34 Das **Strahlrohr einer Feuerwehrspritze** muss bei Höchstleistungen fest an einem Wendekorb montiert sein. Es sollen bei einer Leistung des Strahlrohres von 600 Litern pro Minute keine größeren Kräfte als 1 kN Schub auftreten. Wie groß darf die maximale Austrittgeschwindigkeit des Wassers höchstens sein?

Ü 5.35 **Deep Space 1:** Die Nasa startete vor kurzem ein Pilotprojekt mit Namen „Deep Space 1". Diese Sonde verfügt über einen Ionenantrieb **(siehe Abb. 136.1)** und ein Navigationssystem, mit dem die Sonde in der Lage ist, ihren Kurs im Weltall selbst zu steuern.

Der Rückstoß beschleunigt die Sonde in ca. 300 Tagen auf eine Geschwindigkeit von 12 960 km/h. Der Ionenantrieb wirkt sich auch auf das Gesamtgewicht der Sonde aus, da er wesentlich leichter ausgelegt werden kann als ein herkömmlicher Antrieb. Der Schub des Ionentriebwerks ist gering. Um dennoch auf eine hohe Geschwindigkeit zu kommen, muss das Triebwerk lange in Betrieb bleiben.

Welche Gesamtmasse kann in dieser Zeit (von null) auf diese Geschwindigkeit gebracht werden, wenn ca. 80 kg Xenon als Treibgas ($v = 40$ km/s) zur Verfügung stehen? (Beachte die unterschiedlichen Einheiten!)

Abb. 136.1 ***Ionenantrieb:*** *Als Treibstoff für den Rückstoß verantwortlich ist Xenon. (Als Energiequelle dient Sonnenenergie.) Das Edelgas wird durch ein elektrisches Hochfrequenzfeld ionisiert. Dann werden die Ionen in einem elektrischen Feld beschleunigt und mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen.*

Ergänzung & Ausblick

In naturwissenschaftlichen Konzepten ist das Prinzip der **Erhaltungsgrößen** sehr erfolgreich. So werden Größen bezeichnet, die bei vielen oder allen Vorgängen in der Natur konstant bleiben. Neben der **Energie** und dem **Impuls** gibt es noch andere Erhaltungsgrößen:

- In der Mechanik ist auch der **Drehimpuls** $\vec{L}$ eine Erhaltungsgröße: $\vec{L} = J \cdot \vec{\omega}$

  J … Trägheitsmoment

  ω … Winkelgeschwindigkeit
- Vor allem im Bereich der Chemie wird das Prinzip der **Massenerhaltung** angewendet. Auf ihr beruhen die **chemischen Reaktionsgleichungen**!
- In der Elektrizitätslehre – aber nicht nur dort – ist das Prinzip der **Ladungserhaltung** ein erfolgreiches Konzept: Auf ihr beruht die sogenannte **Knotenregel!**
- In der **Quantenmechanik** – dieses Konzept ist notwendig, wenn man sich mit sehr kleinen Strukturen beschäftigt – gibt es noch weitere fundamentale Erhaltungsgrößen.

5.4.3 Stoßvorgänge *(collision)*

Bei einem Stoß wirken zwischen zwei Körpern für **kurze Zeit Kräfte**, die die Bewegungen der Körper ändern. Dabei werden Energie und Impuls zwischen den Körpern übertragen.

Voraussetzungen: Im Folgenden

- wird der zentrale Stoß zweier fester Körper behandelt, bei dem sich die beiden Körper vor und nach dem Stoß entlang der selben Geraden bewegen.
- werden die Körper wie Massepunkte behandelt, sodass keine Drehbewegung die Vorgänge kompliziert.
- wird ein abgeschlossenes System vorausgesetzt: Während des Stoßvorganges wirken keine äußeren Kräfte auf die Körper ein, auch Energie wird nicht mit außen ausgetauscht.
- gelten Impuls- und Energieerhaltungssatz!
- werden die Geschwindigkeiten vor dem Stoß mit *v* bezeichnet und nach dem Stoß mit w.

Bei einem elastischen Stoß trennen sich die Körper nach dem Stoß, bei einem unelastischen Stoß bleiben sie nach demStoß beisammen.

I. Der elastische Stoß *(elastic collision):*

Während des Stoßes verformen sich die Körper nur kurz; es kommt also zu keiner bleibenden Formveränderung.

Elastischer Stoß

Vor dem Stoß — Nach dem Stoß

v_1 → v_2 → … w_1 → w_2 →

IES:	$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1w_1 + m_2w_2$
EES:	$\frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1w_1^2}{2} + \frac{m_2w_2^2}{2}$
Daraus folgt:	$w_1 = \frac{(m_1 - m_2)\,v_1 + 2m_2v_2}{m_1+m_2}$ und $w_2 = \frac{(m_2-m_1)v_2+2m_1v_1}{m_1+m_2}$

Abb. 137.2

Experiment

Reibungs"freie" Fahrbahn I:

m_1 v_1 m_2 v_2 … m_1 m_2 … w_1 w_2 m_1 m_2

Abb. 137.1 *Auf einer waagrechten Fahrbahn stoßen zwei Fahrzeuge mit gut gefederten Stoßstangen zusammen. Es kommt zu einem* ***vollständig elastischen Stoß****.*
Bei dem Fahrzeug mit der größeren Masse ändert sich die Geschwindigkeit wenig, bei dem Fahrzeug mit der kleineren Masse ändert sich die Geschwindigkeit stark.
Bei großem Masseunterschied kann sich die Geschwindigkeit des leichteren Fahrzeugs sogar umkehren (w_1 ist dann negativ).

Beispiel 5.15

Stoß gegen die Wand

Ein Tischtennisball stößt elastisch im rechten Winkel gegen eine ruhende Wand. m_1 ist gegen m_2 (Masse der Wand) vernachlässigbar klein ($m_1 \approx 0$). Geschwindigkeit der Wand $v_2 = 0$. Zu berechnen sind die Geschwindigkeiten nach dem Stoß (allgemein).

$$w_1 = \frac{(0 - m_2)\cdot v_1 + 0 \cdot v_2}{0 + m_2} = -\mathbf{v_1}$$

$$w_2 = \frac{2 \cdot 0 \cdot v_1}{0 + m_2} = \mathbf{0}$$

Das deckt sich mit der Erfahrung: Die Wand bleibt stehen, und der Ball wird mit $-\mathbf{v_1}$ reflektiert.

Abb. 137.4

Abb. 137.3 *Beispiel für einen* ***vollständig elastischen Stoß****: Der Stoß eines Balles gegen einen Tennisschläger.*

Experiment

Pendel mit Stahlkugeln gleicher Masse:

Vorher — Nachher

Kugel K_1 ruht. | Kugel K_2 wird ausgelenkt. | Kugel K_1 wird ausgelenkt. | Kugel K_2 ruht.

Abb. 138.1 *In Beispiel 5.16 wird die experimentelle Beobachtung rechnerisch bestätigt.*

Beispiel 5.16

Gleiche Masse

Zwei Kugeln mit gleicher Masse $m_1 = m_2 = m$ stoßen vollkommen elastisch zentral zusammen. Zu berechnen sind die Geschwindigkeiten nach dem Stoß (w_1 und w_2, allgemein).

$$w_1 = \frac{(m-m)\cdot v_1 + 2m\cdot v_2}{2m} = \mathbf{v_2}$$

$$w_2 = \frac{0\cdot v_2 + 2m\cdot v_1}{2m} = \mathbf{v_1}$$

Die erste Kugel übernimmt die Geschwindigkeit der zweiten Kugel und umgekehrt, wie das Experiment zeigt.

Lot, $\vec{v}_p$, $\vec{v}$, $\vec{v}_n$, φ, $-\vec{w}_n$, $\vec{w}$, $\vec{w}_p$, Reflexionswinkel, Einfallswinkel

Abb. 138.2 *Reflexionsgesetz*

- **Re˛ exionsgesetz der Mechanik:**

  Das Ergebnis aus Beispiel 5.15 kann man verallgemeinern:

  Stößt ein **elastisches** Objekt unter einem beliebigen Winkel φ **(Abb. 138.2)** gegen eine Wand, dann kann durch Vektorzerlegung des Impulses bzw. der Geschwindigkeit gezeigt werden: **Einfallswinkel und Re˛ exionswinkel sind gleich groß.**

  Bemerkung: Newton betrachtete Licht als Teilchenstrahlung und konnte die Reflexion von Licht durch Anwenden des Reflexionsgesetzes der Mechanik erklären.

II. Der unelastische Stoß *(inelastic collision):*

Bei Stoßvorgängen treten im Allgemeinen **Formänderungen** auf. Beim vollständig unelastischen Stoß bilden sich diese Formveränderungen nicht mehr zurück. Die Körper bewegen sich nach dem Stoß **gemeinsam** mit der Geschwindigkeit w weiter.

Beim unelastischen Stoß geht **Innere Energie *U*** „verloren". Diese Innere Energie steckt in Form von Verformungsenergie im Körper oder wird in Form von Wärme frei.

Experiment

Reibungs"freie" Fahrbahn II:

m_1, v_1, m_2, v_2, $w_1 = w_2 = w$, m_1, m_2

Abb. 138.3 *Auf einer waagrechten Fahrbahn stoßen zwei Fahrzeuge zusammen. Da die Stoßstangen beispielsweise aus Knetgummi gefertigt sind, kommt es zu einer bleibenden Verformung und die Fahrzeuge bleiben aneinander haften. Dies sind die Voraussetzungen für einen* ***vollständig unelastischen Stoß****. Man beobachtet: Bei stark unterschiedlichen Massen ist die gemeinsame Endgeschwindigkeit w fast gleich groß wie die Geschwindigkeit des schwereren Fahrzeugs vor dem Stoß.*

Unlastischer Stoß

Vor dem Stoß: v_1, v_2 — Nach dem Stoß: w

IES: $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1w + m_2w$

EES: $\frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1w^2}{2} + \frac{m_2w^2}{2} + U$

U … Innere Energie (Verformungsenergie)

Daraus folgt für die gemeinsame Endgeschwindigkeit:

$$w = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}$$

Abb. 138.4

Merk & Würdig

Vollständig elastischer Stoß
- kurzzeitige Verformung
- die Körper trennen sich nach dem Stoß

Unelastischer Stoß
- bleibende Verformung
- die Körper bleiben nach dem Stoß zusammen

Ergänzung & Ausblick

Im Großen und im Kleinen gibt es Beispiele für Stoßvorgänge:

- **Supernova:** Sogar bei so einem unvorstellbar großen Vorgang wie der **Explosion eines Sterns** **(siehe Abb. 139.1)** sind Stoßvorgänge wichtig: Die Gashüllen stürzen auf Grund extrem großer Gravitation in sich zusammen. Die Gasteilchen führen z.T. unelastische Stöße aus. Auch Kernenergie wird dabei frei. In der Folge heizt die Energie die äußeren Gashüllen auf. Die bei den Kernreaktionen entstandenen Neutrinos stoßen auf die Gashülle. Die Gashülle wird dadurch mit etwa 1/10 der Lichtgeschwindigkeit weggeschleudert. Bei diesen Vorgängen werden neue Atomkerne erschmolzen und jene Stoffe freigesetzt, aus denen sich neue Sterne und Planeten bilden. **Auch wir selbst bestehen aus „Sternenstaub"!** Unglaublich: Unser Sonnensystem mit dem Planeten Erde und seine „Bewohner" haben eine solche Vergangenheit.

Abb. 139.1 *Aus einer Supernova im Jahr 1054 n. Chr. bildete sich der Krebsnebel.*

- **Teilchenphysik:** In großen Beschleunigeranlagen wie beispielsweise in Genf (CERN) werden Kollisionen von Teilchen am laufenden Band produziert. Auch dort werden die Stoßvorgänge durch EES und IES beschrieben.
- **Atomreaktor:** Die bei der **Kernspaltung** frei werdenden Neutronen müssen abgebremst werden. Sie geben damit einen Teil ihrer Energie ab: die **Kernenergie**. Gebremst werden sie in Stoßvorgängen vor allem mit den viel massereicheren Wasserteilchen.

Beispiel 5.17

Frontal

stoßen zwei gleichschwere Körper mit jeweils gleicher aber entgegengesetzter Geschwindigkeit zusammen. Bei diesem vollständig unelastischen Stoß verformen sich beide Körper.

Wie groß ist die Verformungsenergie? (Allgemeine Rechnung)

Geschwindigkeiten: $v_1 = -v_2$

Massen: $m_1 = m_2 = m$

Die gemeinsame Endgeschwindigkeit w beträgt:

$$w = \frac{m \cdot v_1 + m \cdot (-v_1)}{2m} = \mathbf{0}$$

Der EES ergibt sich mit: $m \cdot \frac{v_1^2}{2} + m \cdot \frac{(-v_1)^2}{2} = m \cdot \frac{(0)^2}{2} + m \cdot \frac{(0)^2}{2} + U$

Daraus folgt für die Innere Energie U: $U = 2m\frac{v_1^2}{2}$

Die gesamte kinetische Energie wird in Innere Energie U umgewandelt!

Abb. 139.2

Übungen

In den folgenden Übungen kannst du an Hand typischer naturwissenschaftlicher Fragestellungen zum Thema Stoßvorgänge Lösungsansätze formulieren und mögliche Ergebnisse abschätzen bzw. errechnen.

Ü 5.36 **Zwei Tennisschläger** mit unterschiedlicher Masse sollen verglichen werden: Produkt A hat 0,7 kg, Produkt B hat 0,8 kg. Beide Rackets werden mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s gegen einen nahezu ruhenden Ball mit m = 57 g geschlagen. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Balls? Warum greifen besser trainierte Tennisspieler wohl zum schweren Schläger?

Ü 5.37 **Eishockey-Bodycheck:** Tommy (m = 110 kg) und Andy (68 kg) stoßen frontal zusammen. Tommy gleitet mit v_T = 25 km/h und Andy mit v_A = 15 km/h.

a) In welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit bewegen sie sich nach dem Zusammenstoß **gemeinsam** weiter ?

b) Welche Energie wird bei der Verformung frei?

Ü 5.38 Ein **Ball** (m = 3 kg) hat eine Geschwindigkeit von 15 m/s und stößt zentral mit einem kleinen Ball (m = 0,2 kg) elastisch zusammen, der in die selbe Richtung mit 2 m/s fliegt.

In welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit bewegen sich die Bälle nach dem Zusammenstoß?

Ü 5.39 **„CSI - Vienna“:** Bei der Tatortermittlung (*Crime Scene Investigation*) ist es notwendig, die Geschossgeschwindigkeit, mit der ein Projektil (m = 10 g) abgefeuert wurde, zu ermitteln. Dazu zielt die Labortechnikerin auf einen ruhenden Sandsack (m = 5 kg). Das Projektil bleibt dort stecken. Eine Videoaufnahme zeigt: Der Sandsack bewegt sich danach mit 1,1 m/s. Wie groß war die Geschossgeschwindigkeit?

Ü 5.40 In diesem Beispiel wiederholst du zusätzlich zu den Stoßgesetzen dein Wissen über Zusammenhänge, die sich aus einem Diagramm ergeben:

Zwei **Eisenbahnwaggons** stoßen beim Verschubbetrieb elastisch zusammen. Dabei ergibt sich das Weg-Zeit-Diagramm **(Abb 140.1)**.

a) Gib die Geschwindigkeiten der Waggons vor dem Stoß in m/s an.

b) Gib die Geschwindigkeiten nach dem Stoß an.

c) Bestimme die Masse des zweiten Wagens, wenn der erste Waggon 5 Tonnen wiegt.

Abb. 140.1 *zu Ü 5.40*

Ü 5.41 *Some **steel balls**: After colliding, the first ball stops, and the last ball moves with the original speed of the first.*

*What can you say about the mass of the balls? **(Fig. 140.2)***

Abb. 140.2 *zu Ü 5.41*

Ü 5.42 Marie-Sofie stellt fest, dass

– am Ende eines Abstellgleises,

– am Anfang eines Kopfbahnhofes,

– im Auslauf einer Hochschaubahn und

– bei Abfahrten von Autobahnen

oft aufwendige Schutzvorrichtungen bestehen.

Marie-Sofie denkt sich, dass diese Bauten im Fall eines Unfalles Schlimmes verhindern sollen. Sie fragt sich, ob es sich im Falle einer Kollision um einen **vollständig elastischen Stoß** oder um einen **vollständig unelastischen Stoß** handelt.

Wie könntest du argumentieren?

Antwort A: Vollkommen klar: **Unelastischer** Stoß; da wird von „vollem Speed“ auf null herabgebremst. Dies ist allemal besser, als reflektiert zu werden. Man muss doch die Beschleunigungskräfte bedenken.

Antwort B: Das ist doch logisch: Natürlich **elastisch**, dann sind nach dem Stoß alle beteiligten Körper unversehrt!

Was ist richtig?

Thema & Gesellschaft

Frauen in der Naturwissenschaft

Zwei Naturwissenschaftlerinnen haben entscheidend die tragenden Säulen der Physik miterrichtet:

- Die Französin EMILIE DU CHATELET hatte vor mehr als 250 Jahren daran Anteil, dass sich die Theorien Newtons in Europa durchsetzten und
- EMMY NOETHER, eine deutsche Mathematikerin, die vor etwa 100 Jahren die **Erhaltungssätze** von Newton auf ein neues universelles mathematisches Fundament stellte. Seither spielen sie unter dem Begriff „Symmetrie" auch in der modernen Physik ein zentrale Rolle.

Dass es Frauen in ihrer wissenschaftlichen Arbeit nicht leicht hatten zeigen folgende Kurzbiographien:

EMILIE DU CHATELET (1706 Paris – 1749 Lunéville)

„Sie war ein großer Mann, dessen einziger Fehler es war, eine Frau zu sein. Eine Frau, die Newton übersetzte und deutete … mit einem Wort, wirklich ein großer Mann". So schrieb Voltaire über seine Freundin.

Ihre gesellschaftliche Stellung als Frau des Marquis du Chatelet-Lomont erlaubte es Emilie, die größten Wissenschafter des Jahrhunderts als Privatlehrer zu gewinnen. So auch VOLTAIRE, den herausragenden Literaten und Philosophen jener Zeit der frühen Aufklärung. Emilie übersetzte Newtons Naturphilosophie ins Französische und gemeinsam mit Voltaire verfasste sie eine „populärwissenschaftliche Version von Newtons Theorie". Das Werk wurde allerdings Voltaire zugeschrieben. Als Frau hatte Emilie es in dieser Zeit nämlich nicht leicht unter eigenem Namen zu veröffentlichen: Ihr Werk **„Einführung in die Physik"** verknüpfte Ideen von Leibniz mit den Newton'schen Prinzipien. Emilie bat den Mathematiker Samuel König, das Werk vor der Herausgabe zu korrigieren und dieser gab sich vor der Akademie der Wissenschaft als Autor aus! 1737 schrieb die Akademie der Wissenschaft einen Wettbewerb aus. Emilie reichte einen Beitrag ein. Sie war überzeugt zu gewinnen. Der Preis ging jedoch an andere.

Emilie du Chatelet trug einen erheblichen Anteil zur Entwicklung der wissenschaftlichen Denkweise bei, die Anerkennung dafür blieb ihr allerdings bei Lebzeiten versagt. Sie starb mit 43 Jahren kurz nach der Geburt einer Tochter im Kindbett.

Abb. 141.1 *EMILIE DU CHALTELETS forderte die Teilhabe von Frauen an allen Menschenrechten.*

EMMY NOETHER (1882 Erlangen – 1935 Pennsylvania)

Emmy und ihrem Bruder Fritz[1] wurde die Mathematik sozusagen in die Wiege gelegt: Ihr Vater war Mathematikprofessor. Emmi begann vorerst eine Ausbildung für Fremdsprachen. Als 1903 Frauen in Bayern regulär studieren durften, immatrikulierten Emmy und ihr Bruder Fritz Mathematik in Erlangen. Sie wurde Spezialistin auf dem Gebiet der Invarianten. 1915 wurde DAVID HILBERT, einer der bedeutendsten Mathematiker dieser Zeit, auf sie aufmerksam und holte Emmy nach Göttingen. Dort setzte sich Hilbert dafür ein, dass sie eine Professur erhielt. Das Gesetz sah dies aber nicht vor. Auch der bekannte Ausspruch Hilberts „Eine Universität ist doch keine Badeanstalt" sowie ein Besuch beim zuständigen Minister änderten nichts. Hilbert löste das Problem: Emmy Noether hielt Vorlesungen, die unter dem Namen von Hilbert angekündigt wurden. Durch Änderungen der gesetzlichen Bestimmungen konnte sich Emmy aber 1921 habilitieren und erhielt eine Professur für Algebra. 1933 emigrierte Emmy Noether in die USA, wo sie 1935 bei einer Operation verstarb.

Abb. 141.2 *EMMY NOETHER; auf ihr Habilitationsansuchen antwortet das Ministerium:* „Die Zulassung von Frauen zur Habilitation als Privatdozent begegnet in akademischen Kreisen nach wie vor erheblichen Bedenken. … vermag ich auch die Zulassung von Ausnahmen nicht zu genehmigen, …"

Frauen sind in Physik und Technik noch immer eine Minderheit.

Obwohl die Gesellschaft vorgibt, Mann und Frau gleichberechtigt zu behandeln, halten sich die männlichen Monopole, vor allem in den Naturwissenschaften, hartnäckig.

- Im Internet findest du ausführlichere Biographien von Emilie du Chatelet und Emmy Noether. Begib dich auf die Internetrecherche nach weiteren berühmten Naturwissenschaftlerinnen: GRETE HERMANN, LISE MEITNER, CHIEN-SHIUNG WU, J. B. BURNELL, CURIE, M. GÖPPERT-MAYER.
- Wer von ihnen hat einen Nobelpreis erhalten?

[1] FRITZ NOETHER musste 1933 als Jude aus rassischen Gründen Deutschland verlassen und emigrierte in die Sowjetunion. Er wurde 1941, nach dem Überfall Deutschlands auf die Sowjetunion, wegen angeblicher antisowjetischer Propaganda vom Stalin-Regime zum Tode verurteilt und erschossen.

6 GRAVITATION

In diesem Kapitel geht es um

- **das geozentrisches Weltbild**
- **das heliozentrisches Weltbild**
- **das Gravitationsgesetz**
- **Satelliten**
- **Gezeitenkräfte**
- **den Kosmos**

6.1 Weltbilder

„Das Wissen steht in den Sternen!“ Dieser Satz soll nicht esoterisches Gedankengut in ein Buch für Naturwissenschaften einschmuggeln. Vielmehr soll diese Einleitung ansprechen, was man in der Vergangenheit – durchaus im naturwissenschaftlichen Sinn – aus dem Sternenhimmel ablesen konnte.

Mit Hilfe der Sterne konnte man

- den Beginn von Jahreszeiten und damit
- die richtige Zeit der Aussaat bestimmen,
- sich auch in der Nacht orientieren und
- auf dem Meer navigieren,
- Grundstücke vermessen und vieles mehr.

Heute gibt es für uns keine Notwendigkeit mehr, zu solchen Fragestellungen die Hilfe der Sterne in Anspruch zu nehmen. Aber in alten Zeiten hat das Lösen obiger Probleme zu neuer Erkenntnis und zu den **Fundamenten unseres naturwissenschaftlichen Weltbilds** geführt.

Über die Jahrhunderte haben sich in allen Kulturen mehr oder weniger mythische Geschichten gebildet, in denen der Himmel im Zentrum stand. Hier sollen keine Mythen, sondern zwei **naturwissenschaftliche Konzepte** vorgestellt werden, die für uns eine besondere Bedeutung haben:

Thema & Gesellschaft

„Das Göttliche steht in den Sternen?“

Auch heutzutage, in unserer aufgeklärten Zeit, glaubt ein Drittel der Bevölkerung quer durch **alle** Altersschichten an mystische geflügelte engelhafte Wesen, die im Himmel wohnen und sogar zuweilen herunterschweben, um uns zu beschützen.

Zwei Drittel der Befragten glaubt an ein Leben nach dem Tod. Wo? **Im Himmel!** Wenn man fragt, wo sich dieser Himmel befindet, dann richtet sich der Blick der Befragten nach oben …

Warum ist das „himmlische Thema“ außerhalb der Naturwissenschaften angesiedelt? Kannst du das begründen? (Dies ist auch eine kleine Anregung für den fächerübergreifenden Unterricht.)

6.1.1 Das geozentrische Weltbild

Wenn wir mit freiem Auge die Sterne und den Verlauf von Sonne und Mond betrachten, dann haben wir den Eindruck von Drehbewegungen.

Der griechische Philosoph **ARISTOTELES** hatte eine Idealvorstellung vom Kosmos:

- Er schrieb der Erde Kugelgestalt zu.
- Jede Bewegung im Kosmos sollte durch Kreisbahnen **um die Erde** als ruhendem Zentrum beschreibbar sein.

Da nicht alle Sterne (die Planeten nennt man auch Wandelsterne) sich an diese Regeln hielten, wurde schon im Altertum dieses Modell verbessert:
PTOLEMÄUS[1] führte weitere sich überlagernde Kreisbahnen ein **(Abb. 143.3)**, sodass ein verbessertes geozentrisches Weltbild ca. 1 500 Jahre lang die Grundlage der Astronomie bleiben konnte.

Abb. 143.1 *PTOLEMÄUS*

Ergänzung & Ausblick

Dass der Anblick des Sternenhimmels in alten Zeiten mit mystischen Vorstellungen einherging, ist wohl nicht verwunderlich: Der Nachthimmel war von funkelnden Kristallen übersät, die sich, wie von unsichtbarer Hand geführt, majestätisch über den Nachthimmel bewegten. Von diesem wunderbaren Schauspiel kann man heute, zumindest in der Nähe von „lichtverschmutzten“ Städten, nur mehr träumen – oder man besucht ein **Planetarium**!

Abb. 143. 2 ***Planetarium Wien (eine Einrichtung der Wiener Volkshochschulen Gmbh):*** *Hier wird der Sternenhimmel auf eine gewölbte Decke, auf das Himmelsgewölbe, projiziert.*

Der Planet kreist um den Mittelpunkt M und …

M

… und der Mittelpunkt M kreist um die Erde.

Abb. 143.3 *Die beobachteten Abweichungen der Planetenbahnen von Kreisbahnen konnte Ptolemäus durch ein System von übereinander gelegten Kreisen (**Epizyklen**) erklären: Ein Planet bewegt sich auf einer Kreisbahn, deren Mittelpunkt selbst auf einem Kreis um die Erde läuft.*

[1] CLAUDIUS PTOLEMÄUS (85 – 160), gebürtiger Ägypter, Astronom und Mathematiker.

6.1.2 Das heliozentrische Weltbild *(heliocentric system)*

KOPERNIKUS[1] vertrat im 16. Jahrhundert die Ansicht, dass die Sonne der ruhende Mittelpunkt sei, um den sich die Erde und alle anderen Planeten auf Kreisbahnen bewegen.

Das **heliozentrische Weltbild** setzte sich schließlich durch:

- Es ist ein einfacheres Modell als das Ptolemäische!
- Die ersten Beobachtungen von GALILEI mit dem **Fernrohr** waren besser im Einklang mit dem heliozentrischen Weltbild.

Doch auch das Modell des KOPERNIKUS konnte die immer genauer werdenden Beobachtungen nicht vollständig erklären. Anfang des 17. Jahrhunderts verbesserte JOHANNES KEPLER das Modell, indem er die Kreisbahnen durch **Ellipsen** ersetzte.

Wer bewegt die Himmelsobjekte?

Von ARISTOTELES war ein göttliches Wesen auserkoren worden, die Sterne zu bewegen, „als in sich ewig ruhender Beweger". Bis ins 17. Jahrhundert wurde das so angenommen.
NEWTON fand eine naturwissenschaftliche Antwort: Er beschrieb die **Kräfte**, die zwischen den Himmelskörpern wirken (siehe Kapitel 6.2). So vervollständigte Newton das geozentrische Weltbild.

Abb. 144.1 *NIKOLAUS KOPERNIKUS*

Der Planet Mars bleibt vor dem Sternenhintergrund scheinbar zurück.
Sternenhimmel
Erdbahn
Marsbahn
Die schnellere Erde zieht am Planeten Mars vorbei.

Abb. 144.2 *KOPERNIKUS erklärte die Unregelmäßigkeiten der Bewegung der Planeten damit, dass sie von der bewegten Erde aus betrachtet werden. Zieht die Erde etwa am Mars vorbei, so scheint der Mars vor dem Sternenhintergrund zurückzubleiben (scheinbar rückläufige Bewegung des Mars).*

Ergänzung & Ausblick

Der einfache Menschenverstand erkennt:

„Die Sonne, der Mond und die Sterne gehen im Osten auf und im Westen unter." Selbst die Planeten scheinen diesem Verhalten zu folgen, auch wenn es bei ihnen bei genauerer Beobachtung problematisch wird. Nimmt man an, dass sich die Himmelssphäre um uns dreht, dann ist damit die Bewegung der Sterne einfach erklärt.

(Die augenscheinlichsten Bewegungen werden natürlich durch die Drehung der Erde um ihre eigene Achse hervorgerufen.)

Die Annahme eines **heliozentrischen Weltbilds**, bei dem die Erde die Sonne umkreist, ist also keineswegs offensichtlich!

Die Kirche vertrat bis zum Ende der Neuzeit die Meinung: „Der Mensch als Gottes ähnlichstes Wesen steht im Mittelpunkt der Welt."

Der katholischen Kirche ist die Sonderstellung des Menschen und der Erde wichtig. Wenn abweichende Theorien verbreitet wurden, konnte so mancher Gelehrter der Ketzerei beschuldigt und sogar verurteilt werden!

Im Lauf der Jahrhunderte hat die Kirche ihre Meinung geändert. Sie akzeptierte, dass sich die Erde in einem **heliozentrischen Sonnensystem** bewegt und sie hat sich posthum sogar bei einigen der zu Unrecht Verurteilten offiziell entschuldigt.

Albert Einstein relativierte!

Die Theorien von GALILEI, NEWTON und KEPLER konnten die Planetenbewegungen nicht genau beschreiben. Eine weitere – bis heute die letzte – Veränderung des Weltbilds wurde im 20. Jahrhundert von ALBERT EINSTEIN formuliert. Sie hat die Himmelsmechanik perfektioniert: die Allgemeine Relativitätstheorie. Diese Theorie geht allerdings über die Thematik dieses Buchs weit hinaus.

Übungen

Wenn du alles beantworten kannst, weißt du über Grenzen und Verlässlichkeit naturwissenschaftlicher Hypothesen und Theorien Bescheid!

Ü 6.1 Durch welche „geometrischen Tricks" wurde **a)** das geozentrische Konzept durch Ptolemäus und **b)** das heliozentrische Weltbild durch Kepler verbessert?

Ü 6.2 Das heliozentrische Weltbild beschreibt die Planetenbewegung auch heute noch

- ☐ vollkommen exakt
- ☐ nicht ganz exakt
- ☐ sehr ungenau
- ☐ mittels Ellipsenbahnen

Ü 6.3 Welchem Satz würdest du ganz zustimmen?

- ☐ Die Wahrheit setzt sich immer durch!
- ☐ Die Wahrheit setzt sich durch, man muss nur warten, bis sich auch das politische bzw. religiöse „Klima" geändert hat.
- ☐ In den Naturwissenschaften gibt es keine ewigen Wahrheiten.
- ☐ Beschreiben zwei Theorien die Gegebenheiten gleich gut, dann ist die einfachere Theorie der schwierigeren vorzuziehen.

Mehrfachantworten möglich

[1] NIKOLAUS KOPERNIKUS (1473 Thorn – 1543 Frauenburg; heute Frombork in Polen) war Jurist, praktizierender Arzt, Geistlicher und Astronom, als Administrator hatte Kopernikus sich auch mit der Geldtheorie auseinandergesetzt.

6.2 Das Gravitationsgesetz *(the law of gravitation)*

Der Legende nach soll ein fallender Apfel NEWTON auf den Gedanken gebracht haben, dass die Kraft, die den Apfel fallen lässt, durch dasselbe Gesetz beschrieben wird wie die Kraft, die den Mond in seiner Bahn hält oder die Jupitermonde um den Jupiter kreisen lässt.

Newton wandte damit erstmals Gesetze für irdische Körper auch auf Himmelsobjekte an. Bis Newton wurden diese beiden Regionen streng voneinander getrennt. Newton stellte ein allgemeines Kraftgesetz für die gegenseitige Anziehung zwischen zwei Körpern auf, das nach ihm benannte **Newton'sche Gravitationsgesetz**:

- Zwischen zwei Massen m_1 und m_2 wirkt eine anziehende Kraft, die direkt proportional zu den Massen ist!
- Die Anziehungskraft wird mit dem Quadrat der Entfernung r kleiner!

Abb. 145.1 *Die beiden Massen ziehen sich mit der Gravitationskraft* $F_1 = F_2 = F$ *gegenseitig an.*

Abb. 145.2 *Im Physiksaal kann mit relativ kleinen Bleikugeln deren anziehende Kraft aufeinander bestimmt werden.*

Merk & Würdig

Die **Gravitation** ist die zwischen Massen wirkende Kraft:

Newtonsches Gravitationsgesetz: $F = G \dfrac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$

G … **Gravitationskonstante: G = 6,67 · 10^{-11} Nm²/kg²**

m_1; m_2 … Massen, $[m] = kg$

r … Abstand zwischen den Körperschwerpunkten, $[r] = m$

- Die Gravitationskraft ist die **schwächste** aller heute bekannten Wechselwirkungskräfte! Das erkennt man in obiger Formel an der kleinen Gravitationskonstante G ($G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg²). Die Gravitationskraft ist daher nur im Zusammenhang mit großen Massen im Makrokosmos (Sterne, Planeten, Galaxien) von Bedeutung.
- Die Begriffe **Gravitationskraft, Schwerkraft und Gewicht** bedeuten dasselbe. Die Formel für die Gewichtskraft $F = m \cdot g$ kann auch mit Hilfe des Newton'schen Gravitationsgesetzes angeschrieben werden (siehe Beispiel 6.1).

Abb. 145.3 *HENRY CAVENDISH*

Experiment

Gravitationswaage von Cavendish:

Den Wert der Gravitationskonstanten experimentell zu bestimmen ist nicht einfach; schließlich ist der Zahlenwert recht klein. CAVENDISH[1] ist dies mit einer Torsionswaage gelungen. Die nebenstehende **Abb. 145.4** zeigt das Prinzip.

Abb. 145.4 ***Prinzip der Gravitationswaage von Cavendish:*** *Zwei kleine Bleikugeln befinden sich an den Enden eines Balkens, der drehbar an einem Quarzfaden hängt. Auf sie wirkt die Anziehungskraft von zwei massiven Kugeln.*

Werden die Massen nahe aneinander gebracht, so wird der Balken mit den kleinen Kugeln auf Grund der Massenanziehung verdreht. Ein Spiegel auf dem sich verdrehenden Faden bewegt sich mit. Ein Lichtstrahl, der vom Spiegel reflektiert wird, zeigt den Drehwinkel an. Der Drehwinkel ist direkt proportional zur wirkenden Kraft.

[1] HENRY CAVENDISH (1731 – 1810), englischer Naturwissenschaftler, entdeckte das Element Wasserstoff, bestimmte die Gravitationskonstante und berechnete daraus die Dichte der Erde.

Beispiel 6.1

Fallbeschleunigung – Gravitationsgesetz

Es soll die Fallbeschleunigung aus dem Gravitationsgesetz berechnet werden.

Masse der Erde: $5{,}99 \cdot 10^{24}$ kg; Erdradius: ca. 6 380 km

Für das Gravitationsgesetz benötigt man noch eine zweite Masse: Die Masse m_2 sei beispielsweise die Masse von Maria oder von Michael, aber das ist nicht wichtig …

Das Gewicht von Maria (oder Michael) kann nun auf zwei Arten errechnet werden, mit der Gewichtskraft $F = m \cdot g$ oder aufwändiger mit der Formel der Gravitationskraft. Setzt man die beiden Kräfte gleich, erhält man: $\boldsymbol{m_2 \cdot g = G \frac{m_E \cdot m_2}{r^2}}$; die Masse m_2 kürzt sich heraus; es ergibt sich:

$$g = G \frac{m_E}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2 \frac{5{,}99 \cdot 10^{24}\ \text{kg}}{(6{,}38 \cdot 10^6\ \text{m})^2} = \mathbf{9{,}82\ m/s^2}$$

Ungenauigkeiten sind auf die nicht berücksichtigte Drehbewegung der Erde (Zentrifugalkräfte verringern die Gravitation – siehe **Abb. 146.1**) und auf die Abplattung bzw. Inhomogenität der Erde zurückzuführen **(siehe Abb. 146.2)**.

Abb. 146.1 *Die Gewichtskraft wird von der Zentrifugalkraft beeinflusst. (Zur Verdeutlichung ist die Zentrifugalkraft übertrieben groß eingezeichnet.)*

- Die Formel der Gewichtskraft $F = m \cdot g$ ist ein Sonderfall des Gravitationsgesetzes.
- Fallbeschleunigung g: Das Beispiel 6.1 bestätigt, dass die Fallbeschleunigung g auf der Erdoberfläche etwa den Wert 9,81 m/s² hat und für größere Höhen kleiner wird, (vgl. nebenstehende **Abb. 146.2**).

Abb. 146.2 *Fallbeschleunigung g in der Umgebung einer kugelförmigen Masse.*

Thema & Gesellschaft

Astrologie und Planetenkonstellationen: Sogar anspruchsvolle Zeitschriften enthalten astrologische Inhalte; Horoskope offenbaren uns, wie Sterne unser Leben beeinflussen. Will man diese Macht, die Planeten oder Sternzeichen über uns scheinbar haben, naturwissenschaftlich erklären, dann muss – außer dem funkelnden Licht der Sterne – die Schwerkraft beachtet werden.

Die Gravitationskraft ist allerdings, wie das folgende Beispiel 6.2 zeigt, vernachlässigbar klein!

Auch sollte man bedenken, dass die Sterne eines Sternzeichens nur scheinbar zusammenhängen, geometrisch können sie – auf Grund ihrer unterschiedlichen Entfernungen zu uns – weit voneinander entfernt sein.

Zusammenfassend kann man sagen: Horoskope haben nur Unterhaltungswert!

Beispiel 6.2

Karl und Karoline sind Sitznachbarn.

a) Annahme: Sie haben beide jeweils 60 kg Masse und sie sitzen 1 m voneinander entfernt.
Wie groß ist ihre Anziehungskraft? (Gravitativ!!!)

b) Die Venus hat eine Masse von $m_V = 4{,}87 \cdot 10^{24}$ kg. Sie kann der Erde bis auf r = 38,3 Millionen Kilometer nahe kommen.
Gesucht: Anziehungskraft zwischen Venus und Karl.

a) $$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2 \frac{60\ \text{kg} \cdot 60\ \text{kg}}{(1\ \text{m})^2} = \mathbf{0{,}24 \cdot 10^{-6}\ N}$$

b) $$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2 \frac{4{,}87 \cdot 10^{24}\ \text{kg} \cdot 60\ \text{kg}}{(3{,}83 \cdot 10^{10}\ \text{m})^2} = \mathbf{13{,}3 \cdot 10^{-6}\ N}$$

Beide Kräfte sind im Vergleich zur Gewichtskraft von Karl bzw. Karoline (ca. 600 N) vernachlässigbar klein. Die Kraft zwischen Karl und Karoline ist über **50-mal kleiner** als die winzige Kraft zwischen Karl und dem Planeten Venus. Bemerkung: Die Venus ist der erdnächste Planet. Im Allgemeinen sind die Kräfte zu den Planeten oder zu den viel weiter entfernten Sternen noch weitaus kleiner!

Übungen

Überprüfe zum Thema Gravitationsgesetz deine Fähigkeit im Finden von Lösungsansätzen und rechnerischen Ergebnissen! Du benötigst dazu folgende Daten:

$m_E = 5{,}99 \cdot 10^{24}$ kg; $m_{Mond} = 7{,}4 \cdot 10^{22}$ kg; $r_{Mond} = 1\,738$ km;
Abstand Mond – Erde: ca.: $384 \cdot 10^3$ km

Ü 6.4 Wie groß ist die Anziehungskraft zwischen Mond und Erde?

Ü 6.5 Berechne die Fallbeschleunigung g_M auf dem Mond.

Ü 6.6 Mit welcher Kraft drückt Max Mühe auf die Erde und die Erde auf Max Mühe?

Abb. 147.1 *Max Mühe (? kg)*

6.2.1 Satelliten *(satellites)*

Satelliten sind Körper, die sich gravitativ gebunden um ein massereiches Zentralgestirn bewegen. Sie werden grob eingeteilt **in natürliche Satelliten**, wie Monde und Planeten, und **künstliche Satelliten**.

Abb. 147.2 *Exoplanet COROT-9 b vor seinem Zentralstern (künstlerische Darstellung). Der Exoplanet wurde vom Weltraumteleskop COROT (siehe Beispiel 6.4, S. 148) entdeckt. Dadurch erklärt sich auch die Bezeichnung des Sterns und des Planeten.*

Beispiel 6.3

Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit eines Satelliten, der sich auf einer kreisförmigen Bahn um die Erde bewegt? (Rechnung allgemein)

Dafür setzt man die Zentrifugalkraft und die Gravitation gleich:

$$m_{Satellit} \cdot \frac{v^2}{r} = G\frac{m_{Satellit} \cdot m_{Erde}}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{G\frac{m_{Erde}}{r}}$$

Ergänzung & Ausblick

Aus Beispiel 6.3 folgt für **Erdsatelliten**[1]:

Die Kreisbahngeschwindigkeit v beträgt:

$$\sqrt{G\frac{m_{Erde}}{r}} \Rightarrow v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

- Erdnahe Satelliten haben eine höhere Bahngeschwindigkeit als erdferne.
- Unterscheide Bahnradius r und Höhe h (Abstand von der Erdoberfläche)!
  $\boldsymbol{h = r - r_{Erde}}$
- Die Masse des Satelliten hat keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit (aber auf die Energie, die nötig ist, um den Satelliten auszusetzen).

Bewegt sich eine Masse mit der Bahngeschwindigkeit v, dann bewegt sie sich auf Kreisbahnen,

– ist sie langsamer, dann stürzt sie in spiralartigen Bahnen auf die Erde,
– ist sie schneller, dann geht die Bewegung in eine Ellipsenbahn über, oder sie verlässt das Gravitationsfeld der Erde.

Abb. 147.3 *Mögliche und unmögliche Satellitenbahnen*

Ein **geostationärer Satellit** befindet sich immer über demselben Punkt der Erdoberfläche. Dies ist nur möglich, wenn:

– er die selbe Winkelgeschwindigkeit ω wie die Erde hat und
– seine Bahn genau über dem Äquator verläuft. (Siehe Beispiel 6.5)

[1] Analoges gilt auch für nicht erdgebundene Satelliten, die sich beispielsweise um die Sonne bewegen und um natürliche Satelliten (z. B. Monde).

Beispiel 6.4

Bestimmung der Masse des Sterns COROT-9

Mit den besten Teleskopen werden laufend Exoplaneten in unserer Galaxis entdeckt. (Exoplanet = extrasolarer Planet; das ist ein Planet anderer Sonnensysteme.) Aus der Messung der Bahndaten, der Geschwindigkeit und des Radius des Planeten kann die Masse des Zentralgestirns bestimmt werden.

COROT-9 ist ein unserer Sonne sehr ähnlicher Stern im Sternbild der Schlange 1 500 Lichtjahre von der Erde entfernt. **COROT-9b** ist ein Planet, der um den Stern COROT-9 kreist und im Jahr 2010 entdeckt wurde. Der Planet ist ein Gasriese und unserem Jupiter sehr ähnlich.

Die Kreisbahngeschwindigkeit von COROT-9b liegt bei 15 km/s, der Abstand des Planeten zu COROT-9 ist: $r = 0{,}407\ AE = 6{,}11 \cdot 10^{11}$ m.

Zu berechnen ist die Masse des Sterns COROT-9.

Abb. 148.1 *Das* ***Weltraumteleskop COROT*** *(„COnvection, ROtation and planetary Transits") ist ein von der französischen Raumfahrtbehörde CNES betriebenes Teleskop, an dessen Entwicklung auch Wissenschaftler der Österreichischen Akademie der Wissenschaften beteiligt waren. Der mit dem Weltraumteleskop COROT ausgerüstete Forschungssatellit bewegt sich in einer Höhe von 896 km. Er überfliegt bei jedem Umlauf den Nord- und Südpol (polare Bahn).*

Die Gegenkraft zur Gravitationskraft ist die Zentrifugalkraft. Da von COROT-9b eine stabile Kreisbahn eingehalten wird, sind Zentrifugalkraft und Gravitationskraft gleich groß:

$$m_{Planet} \cdot \frac{v^2}{r} = G \frac{m_{Planet} \cdot m_{Stern}}{r^2} \Rightarrow m_{Stern} = \frac{v^2 \cdot r}{G}$$

Mit den Zahlenwerten ergibt sich als Masse für das Zentralgestirn

$$m_{Stern} = \frac{(15\,000\ \text{m/s})^2 \cdot 6{,}11 \cdot 10^{11}\ \text{m}}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2} = \mathbf{2{,}06 \cdot 10^{30}\ kg}$$

Die Masse von COROT-9 entspricht ungefähr der Masse unserer Sonne!

Beispiel 6.5

In welcher Höhe kreisen geostationäre Satelliten?

Ein **geostationärer Satellit** hat dieselbe Winkelgeschwindigkeit ω wie die Erde:

$$\omega_E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{24 \cdot 3\,600\ \text{s}} = \mathbf{72{,}7 \cdot 10^{-6}\ s^{-1}}$$

Zentrifugalkraft und Gravitationskraft sind gleich groß:

$$m_{Satellit} \cdot \frac{v^2}{r} = G \frac{m_{Satellit} \cdot m_{Erde}}{r^2}$$

Setzt man v = ω · r ein und kürzt die Satellitenmasse, ergibt sich:

$$\frac{\omega^2 r^2}{r} = G \frac{m_{Erde}}{r^2} \Rightarrow r = \sqrt[3]{G \frac{m_{Erde}}{\omega^2}}$$

$$r = \sqrt[3]{G \frac{m_{Erde}}{\omega^2}} = \sqrt[3]{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Nm}^2/\text{kg}^2 \frac{6 \cdot 10^{24}\ \text{kg}}{(72{,}2 \cdot 10^{-6}\ \text{s}^{-1})^2}} = \mathbf{42{,}3 \cdot 10^6\ m}$$

Abb. 148.2 *Von der Erde aus scheint ein geostationärer Satellit am Himmel still zu stehen. Diese Umlaufbahn kann daher für Fernseh- und Kommunikationssatelliten verwendet werden.*

Von diesem Radius muss noch der Erdradius (6 380 km) abgezogen werden. Ein geostationärer Satellit kreist in etwa **36 000 km** Höhe über dem Äquator.

Ergänzung & Ausblick

Wie kann **Schwerelosigkeit** erreicht werden?

1) Befindet man sich **fern von allen Himmelskörpern**, dann ist die Wirkung jeder Gravitation fast null. Diesen Zustand kann man jedoch **praktisch nicht erreichen**, da die Gravitationskraft von Himmelskörpern mit $1/r^2$ abnimmt und daher nie ganz null wird.
2) **In der Nähe zweier Himmelskörper** (z. B. Erde und Sonne) gibt es Punkte, wo sich die Kräfte gerade aufheben. In diesem Punkt herrscht Schwerelosigkeit, vorausgesetzt die Anziehungskräfte zu anderen Himmelskörpern (z. B. Mars) sind vernachlässigbar klein. (Suche im Internet nach dem Stichwort „Lagrange-Punkte"!)
3) Bei allen **Fall- oder Wurfbewegungen**, bei denen der Luftwiderstand vernachlässigbar klein ist, herrscht Schwerelosigkeit. Auch auf elliptischen oder kreisförmigen **Satellitenbahnen** um die Erde findet ein **freier Fall** statt! Die Astronauten in der Raumstation fühlen sich dort schwerelos. Allerdings treten in der Praxis stets Störbeschleunigungen auf, die beispielsweise durch die Raumstation selbst verursacht werden. Es herrscht deshalb noch eine geringe Schwerkraft, genannt **Mikrogravitation**. (Suche im Internet nach „Fallturm", „Parabelflug" und „ISS"!)

Abb. 149.1 ***Internationale Raumstation ISS:*** *In ca. 340 km Höhe umkreist ISS alle 91 Minuten die Erde. Größe der Station etwa 110 m · 100 m · 30 m. Die Forschung auf der ISS nützt mehrere auf der Erde nicht erreichbare Bedingungen:*

- ***Ungestörte Beobachtungsmöglichkeit:*** *Geräte für astronomische und meteorologische Untersuchungen.*
- ***Weltraumbedingungen:*** *Physikalische und biologische Proben können längere Zeit diesen Extrembedingungen ausgesetzt werden.*
- ***Kräftefrei:*** *Die Experimente im Inneren der ISS nutzen vor allem die permanente Mikrogravitation.*
- ***Weltraummedizin:*** *Außerdem dienen auch die Astronauten selbst als Testpersonen für Untersuchungen.*

Übungen

Überprüfe deine Fähigkeit im Analysieren von naturwissenschaftlichen Fragestellungen, im Finden von Lösungsansätzen und rechnerischen Ergebnissen!

Ü 6.7 Newton hat sein Gravitationsgesetz auch an den Monden des Jupiters überprüft. Der Jupitermond Io ist 0,422 Millionen km von seinem Zentralgestirn entfernt und benötigt für seinen fast kreisförmigen Umlauf 1,77 Erdtage. Berechne die Masse des Jupiters.

Ü 6.8 Zu **Abb. 149.1**: Überprüfe die angegebenen Daten der Raumstation ISS: Übernimm die in **Abb. 149.1** angegebene Umlaufzeit und bestimme Radius und Höhe der Umlaufbahn. (Erdmasse und Radius entdeckst du in Beispiel 6.1)

Ü 6.9 Beim Ausfüllen des folgenden Lückentexts überprüfst du im Bereich der Gravitation, ob du die Fachausdrücke beherrschst und Ergebnisse fachgerecht festhalten kannst:

Ein Satellit in einem höheren Orbit benötigt ________ Zeit für einen Umlauf. Unsere Planeten sind ________ Satelliten, sie bewegen sich um die ________ . Beim freien Fall und auf einer ________ herrscht Schwere________ . Geostationäre Satelliten drehen sich mit derselben ________ wie die ________ . Fernsehsatelliten findet man auf einer Bahn über dem ________ . Der Mittelpunkt kreisförmiger Satellitenbahnen liegt immer im ________ des ________Gestirns. Die Gravitationskraft zwischen zwei Massen nimmt mit dem ________ des Radius ________ .

6.2.2 Die Gezeiten *(the tides)*

Unter Gezeiten versteht man das periodische Steigen und Fallen des Meeresspiegels. Das Steigen nennt man **Flut**, das Fallen **Ebbe**. Ebbe und Flut zusammen nennt man **Tide**. Für das Entstehen der Gezeiten ist das Zusammenspiel zweier Kräfte maßgeblich:

- die gravitativen Kräfte zwischen Erde und Mond – der Einfluss der Sonne ist klein (siehe S. 150 oben)
- die Zentrifugalkraft, verursacht durch das um seinen gemeinsamen Schwerpunkt *S* rotierende System Erde – Mond **(Abb. 149.2)**.

Das Meer braucht jeweils 6 Stunden, um zu steigen und um zu fallen. Theoretisch müsste daher alle 12 Stunden die Flut kommen. Wegen der Eigenrotation der Erde beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei Fluten jedoch 12 Stunden und 25 Minuten.

Der **Tidenhub** (Höhenunterschied Ebbe – Flut) schwankt zwischen einigen cm (in der Adria) und bis zu 15 m an der Küste von Neufundland oder Alaska. Er hängt von der Topographie der Küste, vom Abstand Erde – Mond und Erde – Sonne, von den Meeresströmungen und vom Luftdruck ab.

Zentrifugalkraft
resultierende Gezeitenkräfte
Gravitationskräfte
D
A
S
C
B
Mond
Erde
gemeinsame Rotationsachse durch den Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems

Abb. 149.2 *Die Vektoraddition der beiden Kräfte Zentrifugalkraft (grün) und Gravitationskraft (blau) ergibt die resultierende Gezeitenkraft (rot). In A und C heben sich die Wassermassen (Flut), in B und D senken sie sich (Ebbe). Im Lauf der Zeit wandern die Flutberge um die Erde herum.*

Ergänzung & Ausblick

Die **Sonne** verstärkt oder schwächt die Wirkung des Monds. Ihr Einfluss ist nur halb so groß wie der des Monds.

- **Spring˜ ut:** Stehen Sonne, Erde und Mond in einer Linie, so kommt es zu besonders starken Gezeiten: der Springflut. Diese kann nur bei Neu- oder Vollmond auftreten.
- **Nipp˜ ut:** Hat der Mond ein Viertel seiner Bahn zurückgelegt (Sonne, Erde und Mond bilden einen rechten Winkel), ist die Wirkung der Sonne der des Monds entgegengesetzt: die Nippflut. Diese tritt nur bei Halbmond auf.

Abb. 150.1 *Bei Springflut stehen Erde, Mond und Sonne in einer Linie.*

Abb. 150.2 *Bei Nippflut bilden Mond, Erde und Sonne einen rechten Winkel.*

Thema & Gesellschaft

Der Physiker Gottes: Isaac Newton!

Auf Newtons Grabstein steht:

Hier ruht SIR ISAAC NEWTON

Der mit fast göttlicher Geisteskraft

Der Planeten Bewegung und Gestalten,

Die Bahnen der Kometen und die Gezeiten des Ozeans

Mit Hilfe seiner mathematischen Methode zuerst erklärte.

Er ist es, der die Verschiedenheiten der Lichtstrahlen

Sowie die daraus entspringenden Eigentümlichkeiten der Farben,

Die niemand vorher auch nur vermutet, erforscht hat. …

Die vom Evangelium geforderte Einfalt bewies er durch seinen Wandel.

Mögen die Sterblichen sich freuen, dass unter ihnen weilte

Eine solche Zierde des Menschengeschlechts.

NEWTON war auch umstritten, sein Zeitgenosse GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ schreibt:

„Herr Newton und seine Anhänger haben noch eine sehr spaßige Ansicht über das Werk Gottes. Nach ihnen hat Gott es nötig, seine Uhr von Zeit zu Zeit aufzuziehen, andernfalls würde sie aufhören zu gehen. … Diese Maschine Gottes ist nach ihm sogar so unvollkommen, dass dieser (Gott) sogar gezwungen ist, sie von Zeit zu Zeit zu reinigen, … ja auszubessern."

Im 20. Jahrhundert war ALDOUS HUXLEY in seiner Kritik noch schärfer: „Der Preis, den Newton für seinen höheren Intellekt zahlen musste war zu hoch:

Er war unfähig zu Freundschaft, Liebe, Vaterschaft und zu vielen anderen wünschenswerten Dingen. Als Mensch war er ein Fiasko, als Koloss aber majestätisch."

Besprich die obigen Texte fächerübergreifend mit deinen Lehrkräften!

- Was unterscheidet die beiden Kritiken von Huxley und von Leibniz grundsätzlich?
- Was könnte Newton veranlasst haben, einen Gott zu benötigen, der in die Weltmaschine eingreift? (Sein Glaube? Unverstandene Naturphänomene?)
- Große Persönlichkeiten, die heute „ganz oben" sind – wie wird man über die später denken? (Welche Schwächen sind ihnen eigen?)

6.3 Unser Kosmos *(our universe)*

- Unser **Sonnensystem** ist unsere kosmische Heimat. Ein zentraler Stern – die **Sonne** – mit **Planeten** und ihren **Monden**, die **Kometen** und **Asteroiden** bilden die unmittelbare Nachbarschaft im All.

  Unter günstigen Voraussetzungen lassen sich Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn mit freiem Auge beobachten. Mit einem Feldstecher kann man die vier großen Monde des Jupiters sehen.

Abb. 151.1 *Größenvergleich von Sonne und Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun)*

- Unsere **Galaxie**, die **Milchstraße**: Ein Schritt in die kosmische Umgebung bringt uns von unserem Sonnensystem zu den nächsten Sternen. Die Sterne, die wir mit freiem Auge sehen können sind – für astronomische Größenordnungen – sehr nahe. (Der nächste Fixstern Proxima Centauri ist 4,35 Lichtjahre von uns entfernt.)
  Unsere **Milchstraße *(milky way)*** ist eine Ansammlung von etwa 200 Milliarden Sternen. Die Sterne unserer Galaxie sind in einem scheibenartigen Gefüge angeordnet. Der Durchmesser dieser Scheibe beträgt rund 100 000 Lichtjahre. Unsere Sonne rotiert mit den übrigen Sternen um den Galaxiekern. Ein Sonnenumlauf dauert etwa 200 Millionen Jahre. Die Galaxiescheibe enthält große Mengen an Gas und Staub zwischen den einzelnen Sternen. Diese Masse wird als **interstellare Materie** bezeichnet. Eine derartige Dunkelwolke verhindert eine Betrachtung des Zentrums der Milchstraße. Im Mittelpunkt der Galaxis befindet sich ein schwarzes Loch mit einer Masse von 3 Millionen Sonnen.
- **Galaxienhaufen, lokale Gruppe**: Alle Objekte, die am Sternenhimmel mit freiem Auge zu sehen sind, gehören der Milchstraße oder Galaxis an. Es gibt zwei Ausnahmen: den **Orion-** und den **Andromedanebel**, die selbst Galaxien jeweils mit Milliarden von Sternen sind.
  Im Laufe der Zeit wurden immer größere Strukturen im Universum bekannt. Galaxien bilden Ansammlungen, die Galaxienhaufen. Wir „wohnen" mit etwa 40 weiteren Galaxien in der so genannten **lokalen Gruppe** und diese Ansammlung ist wieder Teil des **Virgohaufens**.

Ergänzung & Ausblick

Entstehung unseres Planetensystems:
Die Entstehung der Planeten hat gleichzeitig mit der Sonne vor etwa **4,4 Milliarden Jahren** stattgefunden. Die zur Sternentstehung nötige Kontraktion der Materiewolke wurde durch eine nahe **Supernova** ausgelöst. Die Materiewolke nahm durch **Gravitation** und wegen der Rotation zunächst die Form einer **Scheibe** an. In der Mitte bildete sich die Sonne, aus der Materie im Außenbereich bildeten sich im Lauf der Zeit die Planeten.
Entstehung des Universums:
Messungen zeigen, dass die Galaxien expandieren. Vor etwa **13,7 Milliarden Jahren** müsste das Universum (nahezu) punktförmig konzentriert gewesen sein. Dann hat eine dramatische Expansion des Raumes stattgefunden. Diese wird als **Urknall *(Big Bang)*** bezeichnet.

Merk & Würdig !

Alle Strukturen unseres Universums, die Sternsysteme, die Galaxien und Galaxienhaufen werden durch die Gravitation zusammengehalten.

Deine Heimatanschrift lautet:

Name:	______________
Gasse:	________ Ort: ________
Land:	Österreich
Planet:	Erde
Stern:	Sonne
Galaxie:	Milchstraße
Galaxienhaufen:	Lokale Gruppe
Superhaufen:	Virgohaufen Universum

Abb. 151.2 *Die Aufnahme zeigt einen jungen Stern. Er ist etwa 1 Million Jahre alt. Die ihn umgebende Scheibe wird sich vermutlich zu einem Planetensystem formen.*

Abb. 151.3 *So ähnlich könnte unser Sonnensystem „von der Seite" aussehen.*

Abb. 151.4 *So ähnlich könnte unsere Milchstraße „von oben" aussehen.*

7 Hydro- und Aeromechanik

In diesem Kapitel geht es um

- **Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen**
- **Druck in Flüssigkeiten**
- **das hydraulisches Prinzip**
- **den statischen Auftrieb**
- **strömende Flüssigkeiten**
- **das aerodynamische Paradoxon**
- **den dynamischen Auftrieb**

7.1 Hydro- und Aerostatik *(hydrostatic and aerostatic)*

In diesem Kapitel werden wir uns mit dem Druck und mit den Kräften in **ruhenden** Flüssigkeiten und Gasen beschäftigen. Dazu müssen wir die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen **Aggregatszustände** kennen.

7.1.1 Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen

(property of fluids and gases)

Materie hat in unserer Umwelt die **Zustandsform**

- fest
- flüssig
- gasförmig

In realen Flüssigkeiten sind die Kräfte zwischen den Molekülen kleiner als beim Festkörper. Sie sind aber größer als zwischen den Molekülen in einem Gas. Mit den molekularen Bindungskräften kann man die unterschiedlichen Eigenschaften der drei Zustandsformen der Materie erklären, beispielsweise, dass die molekularen Bestandteile einer Flüssigkeit gegenseitig verschiebbar sind.

Ideales Gas, ideale Flüssigkeit: Um das Verhalten von Flüssigkeiten oder Gasen besser zu verstehen, vereinfacht man oft. Beispielsweise wird die innere Reibung vernachlässigt. Man spricht dann von **idealen Fluiden** (ideales Gas, ideale Flüssigkeit).

Zustandsformen der Materie

		Innere Reibung (Viskosität)	Verhalten unter Druck	Form
FEST		sehr groß	Elastizität je nach Stoffart	Kristalline ohne homogene Form
FLÜSSIG	real	klein	kaum zusammendrückbar	E_{pot} ist minimal; Tropfenform
	ideal	0	inkompressibel	
GASFÖRMIG	real	sehr klein	kompressibel bis auf Grenzwert	füllt Raum vollständig aus
	ideal	0	kompressibel	

Tabelle 153.1 *Aggregatzustände*

Ergänzung & Ausblick

Zusätzlich zu den drei Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig existiert auch noch der im Sonnensystem am häufigsten vorkommende Zustand: Plasma.

Sterne bestehen nämlich aus ionisierten Gasen (Elektronen und Ionen), die metallähnliches, aber auch gasförmiges Verhalten zeigen.

Abb. 153.1 *Zwei Laserstrahlen erzeugen in einer Vakuumkammer beim Auftreffen auf eine Metalloberfläche* ***Plasma***.

Experiment

Druckfortp˜ anzungsgesetz

Abb. 154.1 *Das Experiment zeigt, dass die Flüssigkeit nach allen Seiten aus dem Behälter gleich stark heraussprüht. Der (statische)* ***Druck*** *wirkt in einer Flüssigkeit in alle Richtungen gleich.*

Abb. 154.2 ***Hydraulisches Prinzip***

7.1.2 Hydraulisches Prinzip *(hydraulic principle)*

Der **Druck *p*** ist definiert als Betrag der Normalkraft *F* pro Fläche *A*; er ist eine skalare Größe: $p = \frac{F}{A}$

- **Druckfortp˜ anzungsgesetz:**

  Das Experiment **(Abb. 154.1)** zeigt, dass der **(statische) Druck** in einer Flüssigkeit in alle Richtungen gleichmäßig wirkt. Dies wird als **Druckfortp˜ anzungsgesetz** bezeichnet.

  Betrachtet man die Kolben in **Abb. 154.2**, dann ist ersichtlich: Die Arbeit, die am rechten Kolben verrichtet wird, ist gleich der Arbeit, die der linke Kolben verrichtet (Energieerhaltungssatz):

  $$F_1 \cdot \Delta s_1 = F_2 \cdot \Delta s_2 \qquad (1)$$

  Aufgrund der Inkompressibilität von Flüssigkeiten müssen die verschobenen Volumina gleich sein: $A_1 \cdot \Delta s_1 = A_2 \cdot \Delta s_2 = V$

  Dividiert man Gleichung (1) durch das Volumen V ergibt sich:

  $$\frac{F_1 \cdot \Delta s_1}{A_1 \cdot \Delta s_1} = \frac{F_2 \cdot \Delta s_2}{A_2 \cdot \Delta s_2} \Rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Rightarrow p_1 = p_2 = p \qquad (2)$$

  Der Druck *p* bleibt konstant!

- **Hydraulisches Prinzip:**

  Der Druck pflanzt sich gleichmäßig fort[1]. Daraus folgt eine wichtige technische Anwendung:

  $$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$ **… hydraulisches Prinzip**

  Da die Kolbenkräfte vom Verhältnis der Kolbenflächen abhängen, ist eine Kraftverstärkung möglich.

  Es gilt auch hier die **Goldene Regel der Mechanik**: Was an Kolbenkraft gewonnen wird, das geht an Kolbenweg verloren.

  Hydraulische Systeme werden in einer Vielzahl verschiedenster Anwendungen eingesetzt: Hydraulische Presse, Wagenheber, Bremsanlage, Liftanlage, in Baumaschinen …

Merk & Würdig

Druckfortp˜ anzungsgesetz

In stehenden Flüssigkeiten (und in Gasen) wirkt der Druck nach allen Richtungen gleich stark. Der Druck in Flüssigkeiten breitet sich nach allen Seiten in gleicher Stärke aus.

Druck, Kolbendruck p

$$p = \frac{F}{A}$$

$[p]$ = N/m² = 1 Pa, 1 Pa = 10^{-5} bar

A … gedrückte Fläche, $[A] = m^2$

F … Normalkraft, $[F] = N$

Hydraulisches Prinzip

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

[1] In der Ableitung für das Druckfortpflanzungsgesetz wird vorausgesetzt, dass **keine Reibung** vorliegt, dass die Flüssigkeit **inkompressibel** und der Höhenunterschied zwischen den Kolben gering ist.

Ergänzung & Ausblick

- Zur Messung von Druck werden Manometer verwendet.
- Unter **Druckkraft *F*** versteht man den Vektor $\vec{F} = p \cdot \vec{A}$. Dieser Vektor wirkt normal auf die Fläche *A*, die dem Druck *p* ausgesetzt wird. (Oft wird im technischen Alltag zwischen Druck und Druckkraft nicht streng unterschieden, was zu Missverständnissen führen kann.)
- In der Praxis muss bei längeren Druckleitungen zusätzlich der **Druckabfall** pro Rohrmeter beachtet werden. Er ist vor allem vom Rohrdurchmesser abhängig und wird durch die innere Reibung verursacht.

Beispiel 7.1

An einer **hydraulischen Hebebühne** wird ein Hydraulikzylinder ausgetauscht. Die Mechaniker setzen allerdings einen Kolben (bzw. Zylinder) mit etwas geringerem Durchmesser ein: $d_2 = 45$ mm. Die Durchmesser der drei verbleibenden Originalbauteile betragen $d_1 = 50$ mm.

Wie unterscheiden sich die Hubkräfte der Kolben (in Prozent)?

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{d_1^2}{4}}{\frac{d_2^2}{4}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{5}{4{,}5}\right)^2 = \mathbf{1{,}23}$$

Die Original-Hydraulikkolben ermöglichen Kräfte, die um **23 % größer** sind.
(Die Durchmesser unterscheiden sich um 11 %)

Abb.155.1 *Hydraulische Hebebühne*

Beispiel 7.2

Tiefdruckpresse

Welche Kraft ist mit dem Hydraulikzylinder erzielbar? (Durchmesser: 1500 mm; Arbeitsdruck: 350 bar)

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = p \cdot A = p \cdot \frac{d^2\pi}{4}$$

$$F = 350 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot \frac{(1{,}5 \text{ m})^2 \pi}{4} = \mathbf{62\ MN}$$

Mit dem Hydraulikzylinder sind **62 MN** erzielbar.

Abb. 155.2 *Hydraulikzylinder einer Tiefdruckpresse*

Übungen

Wenn du diese Übungen löst, kannst du zum Thema Hydraulik nach einer Analyse der Fragestellungen Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 7.1 In Wien soll eine Donaubrücke (Praterbrücke) angehoben werden, damit die Rolllager repariert werden können. Für ein Teilstück, das 5 700 t wiegt, setzt man Hydraulikstempel mit einem Durchmesser von 35 cm ein. Die Pumpe liefert einen Betriebsdruck von 320 bar. Wie viele Stempel sind notwendig, um die Brücke zu heben?
Tipp: Wenn du die gesamte Stempelfläche errechnest, kannst du auf die Anzahl schließen.

Ü 7.2 Wie groß ist die Kraftverstärkung einer Hydraulikanlage (als Verhältniszahl), wenn die Kolbendurchmesser 2,5 cm und 10,5 cm betragen?

Ü 7.3 *In a **hydraulic brake**, a force of 500 N is applied to a piston of an area of 5 cm². If the other piston has an area of 20 cm², what is the force exerted on it? („exerted" = „ausgeübt")*

7.1.3 Schweredruck *(pressure of gravitation)*

Beim Tauchen spüren wir einen Druck in den Ohren. Er wird stärker, wenn man tiefer taucht. Dieser Druck wird durch das Gewicht der Flüssigkeit selbst hervorgerufen und als **Schweredruck** oder **Gewichtsdruck** p_G bezeichnet.

A

h

ρ

Abb. 156.1 *Druck in stehenden Flüssigkeiten*

Merk & Würdig

Gewichtsdruck, Schweredruck p_G:

$\boldsymbol{p_G = {}^\circ \cdot g \cdot h}$

$[p_G] = Pa$

ρ … Dichte der Flüssigkeit, $[\rho] = kg/m^3$

g … Fallbeschleunigung, $g = 9{,}81\ m/s^2$

h … Höhe der Flüssigkeitsoberfläche, $[h] = m$

In **Abb. 156.1** ist skizziert: In einer bestimmten Tiefe drückt von oben eine Flüssigkeitssäule mit der Höhe h und dem Querschnitt A auf die Flüssigkeit darunter. Ihr Gewicht erzeugt den Druck:

$$p_G = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{A} = \frac{A \cdot h \cdot \rho \cdot g}{A} = \rho \cdot g \cdot h$$

In der Tiefe h herrscht ein Gewichtsdruck $p_G = \rho \cdot g \cdot h$.

Das Experiment **(Abb. 156.2)** bestätigt obige Überlegung zum Gewichtsdruck.

Experiment

Kommunizierende Gefäße

Abb. 156.2 *Die Flüssigkeit steigt überall gleich hoch. Dies passt gut zu der Überlegung des Gewichtsdruckes. Dieser ist nur von der Höhe und nicht von der Gefäßform abhängig.*

Die Anwendungen sind vielfältig: Die Funktion der Gießkanne oder Teekanne, aber auch unsere Trinkwasserversorgung basieren auf dem Schweredruck in verbundenen Röhren. Beispiel: Vom Schneeberg bis Wien fließt das Hochquellenwasser „von ganz allein", obwohl die Rohrleitung an manchen Stellen auch ansteigt.

Beispiel 7.3

In welcher **Meerestiefe** herrscht ein Druck von 50 bar?

$$h = \frac{p_G}{\rho \cdot g} = \frac{50 \cdot 10^5\ \text{Pa}}{1\,000\ \text{kg/m}^3 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2} = \mathbf{510\ m}$$

Ergänzung & Ausblick

Blutdruck: Beim Stehen ist der Blutdruck auf Grund des Gewichtsdrucks des Bluts in den unteren Extremitäten größer (siehe Abb. 157.1). Beim Liegen ist die Druckverteilung in den großen Adern des Menschen relativ homogen. Beim plötzlichen Aufstehen eines Menschen verändert sich der Druck in den Adern. Die Blutdruckmessung sollte auf der Höhe des Herzens vorgenommen werden. (Siehe auch Kap. 1, **Ü 1.6**)

Abb. 157.1 *Zusammenhang zwischen Höhe und Blutdruck eines Menschen.*

Atmosphärischer Luftdruck: Auch in Gasen tritt ein Schweredruck auf. Dieser ist aber, da sich Gase im Gegensatz zu Flüssigkeiten unter ihrem eigenen Gewicht verdichten, nicht mit den Überlegungen zum hydrostatischen Druck berechenbar. Die Dichte der Luft ist in Bodennähe größer als in hohen Luftschichten. Auch die Wetterlage beeinflusst den Luftdruck. Der ungefähre Zusammenhang zwischen Druck und Höhe wird durch die barometrische Höhenformel angegeben. Diese Formel kannst du leicht über das Internet in Erfahrung bringen …

Typische Werte von Druck in Flüssigkeiten und Gasen

Beispiel	Druck
Ultrahochvakuum (UHV)	10^{-10} Pa
Mittlerer Atmosphärendruck auf Meeresniveau	$1{,}0^{13} – 10^5$ Pa
Wasserdruck in 10 m Meerestiefe	1 bar = 10^5 Pa
Druck in Autoreifen je nach Kfz und Reifentype	2 bar = $2 \cdot 10^5$ Pa
Druck des Kühlwassers im Atomreaktor (Druckwasserreaktor)	$1{,}70 \cdot 10^7$ Pa
Druck im Inneren der Sonne	$34 \cdot 10^{12}$ Pa

Tabelle 157.1 *Typische Werte von Druck in Flüssigkeiten und Gasen*

Übungen

Wenn du die folgenden Übungen löst, kannst du zum Thema Gewichtsdruck nach einer Analyse der Fragestellungen Werte abschätzen, Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 7.4 **Versuch von Pascal** (zu Abb. 157.2): In seinem berühmten Experiment montierte PASCAL ein dünnes langes Rohr dicht auf ein volles Fass. Pascal füllte ein wenig Wasser in das Rohr und erreichte eine Höhe von 8 m bis das Fass zerbrach. Welchen Druck erreichte Pascal im Fass?

Ü 7.5 **Notfall:** Ein Leck im Kiel eines Segelbootes 1,5 m unter der Wasserlinie tritt auf! Kannst du das Loch nur mit dem Daumen (A = 1 cm²) zuhalten? Berechne die notwendige Kraft und vergleiche das Ergebnis mit deinem Schätzwert.

Ü 7.6 Eine stählerne **Taucherkugel** wird für einen Druck von 600 bar ausgelegt. Welche Tiefe kann maximal erreicht werden und welche Kraft wirkt auf die Sichtluke (Durchmesser 33 cm)?

Abb. 157.2 *BLAISE PASCAL montierte ein langes Rohr dicht auf ein volles Fass. Warum platzte das Fass, als er das Rohr mit Wasser füllte? (PASCAL benötigte dafür nur wenig Wasser, da das Rohr dünn war.)*

Übungen

Ü 7.7 Teste dich selbst! Wenn du die Höchstpunktezahl erreichst, dann weißt du über das Thema Druck in stehenden Flüssigkeiten und Gasen gut Bescheid!

a) Welche Sätze beschreiben Zusammenhänge mit der Größe Druck richtig?

- ☐ Der Druck ist eine Erhaltungsgröße.
- ☐ In Flüssigkeiten ist der Druck oben größer als unten.
- ☐ Druck in einer Flüssigkeit wirkt in alle Richtungen gleich stark.
- ☐ Druck in einer Flüssigkeit nimmt mit der Wassertiefe linear zu.

b) Schätze ab! Welcher Druck wirkt in 900 m Wassertiefe?

☐ 90 bar ☐ 900 mbar ☐ 900 Pa ☐ 9 MPa

c) Welche Aussagen zum Thema Hydraulik sind korrekt?

- ☐ Mit Hilfe des hydraulischen Prinzips kann Druck und Kraft verändert werden.
- ☐ Hydraulikanlagen füllt man mit Hydrauliköl oder Pressluft.
- ☐ Hydraulikanlagen dienen zur Kraftverstärkung.
- ☐ Das hydraulische Prinzip funktioniert nicht mit Gasen, da diese kompressibel sind.

Mehrfachantworten möglich.

Abb. 158.1 ***Auftriebskraft***

Abb. 158.2 ***Technisches Wahrzeichen in der Zeit der Aufklärung:*** *Im Heißluftballon der Gebrüder Montgolfier erhebt sich der Mensch 1783 zum ersten Mal in die Lüfte.*

7.1.4 Statischer Auftrieb *(buoyant force)*

Wird ein Körper in eine Flüssigkeit eingetaucht, so wirkt eine nach oben gerichtete Kraft auf ihn. Diese Kraft heißt **hydrostatischer Auftrieb**. Analog wirkt in Gasen ein **aerostatischer Auftrieb**.

Die folgenden Überlegungen gelten für beide Auftriebsarten. Wir betrachten der Einfachheit halber die Kräfte auf einen quaderförmigen Körper im Inneren einer Flüssigkeit **(Abb. 158.1)**:

- Aus Symmetriegründen heben die horizontalen Kräfte einander auf.
- Von oben wirkt die Kraft $F_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A$ auf die Deckfläche A des Quaders.
- Von unten wirkt die Kraft $F_2 = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A$ auf die Grundfläche A des Quaders.

Die resultierende dieser zwei entgegengesetzt wirkenden Kräfte ist die **Auftriebskraft** F_A:

$$F_A = F_2 - F_1 = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A - \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A = \rho \cdot g \cdot A \cdot (h_2 - h_1)$$

Das Volumen des Quaders ist $V = A \cdot (h_2 - h_1)$. Damit ergibt sich die Auftriebskraft, die immer nach oben wirkt, mit:

$$\mathbf{F_A = {}^\circ \cdot V \cdot g = m \cdot g}$$

$\rho \cdot V = m$ ist die Masse der verdrängten Flüssigkeit.

Die **Auftriebskraft** entspricht der **Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit.**

- **Aerostatischer Auftrieb:** Die Überlegungen zum hydrostatischen Auftrieb gelten im Prinzip auch für den Auftrieb in Gasen. Bei einem Heißluftballon oder einem Heliumballon muss für die Dichte ρ in $F_A = \rho \cdot g \cdot V$ die Dichte der umgebenden Luft eingesetzt werden.

- **Steigen, Sinken, Schwimmen und Schweben:** Ob ein Körper schwimmt, hängt nicht nur von der Auftriebskraft, sondern auch von seinem Gewicht ab, wie **Abb. 159.1** zeigt:

Abb. 159.1

Ergänzung & Ausblick

- **Messtechnik:** Da der Auftrieb von der Dichte der Flüssigkeit abhängt, kann vom Volumen der verdrängten Flüssigkeit auf die Dichte der Flüssigkeit geschlossen werden. **Aräometer (Abb.159.2)** sind Messinstrumente zur Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten oder der Konzentration gelöster Stoffe. Der längliche Hohlkörper ist unten schwerer und taucht so tief in die Flüssigkeit ein bis Auftriebskraft und Gewicht im Gleichgewicht sind. Die Skala ist oft für die direkte Anwendung geeicht (Fettgehalt von Milch, Alkoholgehalt von Getränken …).
- **Kamine° ekt:** Auf Grund des aerostatischen Auftriebs streben Gase mit geringerer Dichte in die Höhe und Gase mit großer Dichte senken sich ab. Da sich bei Erhitzung Gase ausdehnen, steigen wärmere Gase auf. Dieses Prinzip heißt **Kamine° ekt**. Auf ihm beruht die Funktion von Rauchfängen.
- **Meteorologie:** In der Meteorologie werden die **thermischen Aufwinde** ebenfalls über den Kamineffekt erklärt. Andererseits kann sich die Luft verschiedener Dichte bei Windstille in bestimmten Höhen schichten. So bilden sich z. B. **Kaltluftseen** in Becken und Tallagen (inverse Wetterlage).
- **CO_2-See:** Da CO_2 eine höhere Dichte hat als Sauerstoff, bildet sich, wenn keine Luftströmung vorhanden ist (z. B. in Gärkellern), ein „CO_2-See". Dort besteht Erstickungsgefahr!
- **Tiefgang:** U-Boote, aber auch herkömmliche Schiffe, können ihren Tiefgang vergrößern, indem sie Wasser aufnehmen (fluten). Sie können hochsteigen, indem sie Wassertanks z. B. mittels Pressluft entleeren. Damit verändert sich das effektive Gewicht des Schiffes. Analog können auch Fische mit Hilfe ihrer Schwimmblase die Tauchtiefe variieren.

Abb. 159.2
historisches Aräometer

Merk & Würdig

Hydrostatische Auftriebskraft F_A

$F_A = ° \cdot V \cdot g = m \cdot g$, $[F_A] = N$

Die Auftriebskraft entspricht der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit.

ρ … Dichte der Flüssigkeit, $[\rho] = kg/m^3$

g … Fallbeschleunigung, $g = 9{,}81\ m/s^2$

V … Verdrängtes Flüssigkeitsvolumen, $[V] = m^3$

Analog gilt der Formelzusammenhang auch für den statischen Auftrieb in Gasen.

Beispiel 7.4

Eines der größten **Containerschi° e** der Welt, die **„Emma Maersk"** kann Container mit einer Masse von 157 000 t transportieren. Angenommen, es verdrängt ein Volumen von 240 000 m^3 Wasser: Welche Auftriebskraft wirkt und welche Gesamtmasse hat das Schiff?

$F_A = \rho \cdot V \cdot g = 1\,000\ kg/m^3 \cdot 240\,000\ m^3 \cdot 9{,}81\ m/s^2 = \mathbf{2\,354\ MN}$

Das Schiff hat daher $m = \frac{F_A}{g} = \mathbf{240\,000\ t}$ Gesamtmasse.

Abb. 160.1 ***Containerschi˛ e*** *sind wahre Giganten. Die Größten haben eine Länge von ca. 400 m, eine Breite von 56 m und einen Tiefgang von 16 m.*

Beispiel 7.5

Ein kugelförmiger **Heißluftballon** hat einen Radius von 10 m und ist mit warmer Luft ($\rho = 0{,}97\ kg/m^3$) gefüllt. Welche Last kann der Ballon tragen? (Dichte der Atmosphäre: 1,3 kg/m^3; Masse der Ballonhaut, des Brenners und des Korbes: 460 kg)

Volumen des Ballons: $V = \frac{4}{3} \cdot r^3\pi = \frac{4}{3}\,(10\ m)^3\pi = \mathbf{4\,190\ m^3}$

Auftrieb: $F_A = \rho \cdot V \cdot g = 1{,}3\ kg/m^3 \cdot 4\,190\ m^3 \cdot 9{,}81\ m/s^2 = \mathbf{53{,}42\ kN}$

Dies entspricht auch der Gewichtskraft des gesamten Ballons!
Die Masse der mitgeführten Heißluft ergibt sich mit:

$m = \rho \cdot V = 0{,}97\ kg/m^3 \cdot 4\,190\ m^3 = \mathbf{4\,064\ kg}$

Zieht man das Eigengewicht der Heißluft, des Korbes, der Ballonhaut und des Brenners von der Auftriebskraft ab, ergibt sich eine Last von ca. 9,1 kN. Der Ballon kann also Passagiere und Gepäck mit einer Gesamtmasse von **etwa 900 kg** tragen.

Abb. 160.2

Experiment

Aerodynamische Auftriebskräfte

- Vor dem Einschalten der Pumpe ist die Waage austariert. Die beiden Gewichte – links eine **großvolumige** Styroporkugel und rechts eine kleine Bleikugel – sind (scheinbar) gleich schwer.
- Schaltet man die Vakuumpumpe ein, dann neigt sich die Balkenwaage nach links. Das Gewicht der Styroporkugel ist größer!
- Das Experiment bestätigt: Die Auftriebskräfte sind **abhängig vom Volumen** des verdrängten Gases. Diese Kräfte wurden durch das Evakuieren stark verringert.

Abb. 160.3 ***Vakuumpumpe, Balkenwaage*** *unter dem* ***Glassturz***

Beispiel 7.6

Gewichtsmessung

Toni Treibauf will sein Gewicht genau messen. Da der aerostatische Auftrieb die Messung beeinflusst, bezieht er diesen mit ein. Wie groß wäre der **systematische Fehler** in %, wenn Toni den Auftrieb vernachlässigte? (ρ_{Luft} = 1,3 kg/m^3)

Der Fehler ist die Auftriebskraft. In die Rechnung geht das Volumen von Toni ein. Schätzt man, dass Tonis gemittelte Dichte der von Wasser entspricht, erhält Toni für die Auftriebskraft

$$F_A = °_{Luft} \cdot g \cdot V = °_{Luft} \cdot g \frac{m}{°_{Toni}}$$

Für den systematischen Fehler in % ergibt sich:

$$f = \frac{F_A}{F_{Gewicht}} \cdot 100 = \frac{\rho_{Luft} \cdot g \cdot \frac{m}{\rho_{Toni}}}{m \cdot g} \cdot 100 = \frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Toni}} \cdot 100 = \frac{1{,}3}{1\,000} \cdot 100 = \mathbf{0{,}13\ \%}$$

Der Fehler der Gewichtsmessung ohne Berücksichtigung des Auftriebs durch die Atmosphäre liegt bei **1,3 Promille.**

Warum versinken die Berge nicht?

Kathi hat im Geographieunterricht gehört, dass die Erdkruste sehr dünn sein soll (30 – 50 km, im Vergleich zu 6 400 km Erdradius). Als sie bei einer Wanderung die gewaltigen Gebirgsstöcke der Hohen Tauern bewundert, fragt sie: „Wie können auf der dünnen Erdkruste so schwere und große Berge stehen? Warum reißen diese kein Loch in die dünne Erdkruste?" Ihr Bruder meint, dass die Erdkruste schon starr genug sein wird, um die Berge zu tragen. Hat der Bruder recht?

Nicht nur die Berge, sondern die gesamten äußeren Schichten des Erdmantels würden versinken, wären da nicht die **Auftriebskräfte**. Die dichteren Schichten des Erdmantels schwimmen auf dem zähflüssigen Erdkern, genauso wie die hohen Gebirge. Ein 3 000 m hoher Berg taucht fast 20 km tief ein, was Echolotmessungen bestätigen.

Im übrigen darf man die Erde nicht so statisch sehen: Es tauchen immer wieder schwerere Teile des Erdmantels ab, und weniger dichte Kernmaterie steigt wegen des Auftriebs auf. Dies ist auch ein Grund für Erdbeben und Vulkanismus. Der Zeitrahmen für solche Bewegungen liegt allerdings außerhalb unserer Alltagserfahrung bei Millionen von Jahren.

Übungen

In den folgenden Übungsbeispielen kannst du zum Thema „statischer Auftrieb" nach einer Analyse der Fragestellung Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 7.8 **Grundwasser:** Frau Baumeisterin Hermine Viertelkeller versucht ihrem Kunden eine besonders schwere Fundamentplatte als Kellerboden einzureden. Sie argumentiert, dass sonst der Keller auf Grund des hohen Grundwasserspiegels aufschwimmen kann. Hat sie recht? Masse des Kellers noch ohne Kellerdecke in herkömmlicher Bauweise: 95 Tonnen. Grundfläche des Kellers: 100 m^2, Kellertiefe unter dem Fundament: 2 m. Das Grundwasser ist auf dem feuchten Grund schon in 1 m Tiefe anzutreffen. Welche Kräfte wirken?

Ü 7.9 **Leonhard Luftikuss** hat luftige Pläne: Ein **Riesenluftschi°** könnte, so seine Berechnungen, bis 160 Tonnen transportieren, bei einem Leergewicht von 260 Tonnen. Welches Gesamtvolumen ist dazu notwendig? (Dichte der Atmosphäre, in der das Luftschiff noch schweben kann: 0,76 kg/m^3)

Ü 7.10 **Totes Meer:** Um wie viel Prozent sind die Auftriebskräfte für einen Schwimmer im Toten Meer (ρ = 1,2 kg/dm^3) größer? Vergleiche mit Süßwasser. Achtung Fangfrage!

Abb. 161.1

Ü 7.11 ***Archimedes:*** *Perhaps you have heard the story of the King's crown. It is told that „Archi", while taking a bath, discovered a method for figuring out whether the crown had been made of pure gold or a cheaper metal. Archimedes was so excited about his discovery, he ran straight from the tub through the streets shouting, »Eureka!«. „Archi" took the weight of the crown inside and outside of water. The ratio of the weight was 0,059 (ρ_{Gold} = 19,32 kg/dm^3). What do you say, was the crown of pure gold? („ratio"* = Verhältnis)

7.2 Strömende Flüssigkeiten und Gase *(moving fluids)*

- **Stromlinien** (*Streamline*): Um ein Bild zu bekommen, in welche Richtung und wie schnell sich Gase oder Flüssigkeiten bewegen, benützt man ein Stromlinienbild. Das **Stromlinienbild** veranschaulicht das **Geschwindigkeitsfeld**.
  - Die Stromlinie zeigt in **Richtung** des jeweiligen Geschwindigkeitsvektors.
  - Dort, wo die Strömung schneller strömt, liegen die Stromlinien dichter beisammen.

- **Strömungen** können unterteilt werden in
  - **Laminare Strömungen (wirbelfreie Strömungen):** Bei niedrigen Geschwindigkeiten bilden sich kaum Turbulenzen (z. B. langsam zähfließendes Öl).
  - **Turbulente Strömungen (nicht wirbelfrei):** Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten bilden sich hinter Hindernissen oder in Randzonen Wirbel.

Abb. 162.1 ***Windkanal:*** *Mit optischen Methoden können im Windkanal Strömungen sichtbar gemacht werden.*

Tabelle 162.2 *Erzeugung von Strömungsbildern mit Rauchfäden*

Abb. 162.3 *Bei* ***turbulenter Strömung*** *dreht sich das eingezeichnete Rad.*

- **Ideale Strömung:** Zunächst nehmen wir an, es sei bei der Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen keine Reibung und damit auch **kein Verlust** von mechanischer Energie bzw. von Wärmeenergie gegeben. Diese Darstellung stellt natürlich eine Vereinfachung dar. Solche Strömungen, bei denen die Bindungskräfte zwischen den Molekülen vernachlässigt werden können, werden mit dem Begriff **ideale Strömung** bezeichnet.

7.2.1 Geschwindigkeit in einer idealen Strömung *(speed of plugflow)*

In einer idealen Strömung muss, weil die Flüssigkeit inkompressibel ist, während einer bestimmten Zeit Δt durch alle Querschnitte das gleich große Volumen durchfließen **(siehe Abb. 162.4)**.

Großer Querschnitt, kleine Geschwindigkeit.
Kleiner Querschnitt, große Geschwindigkeit.
A_1 v_1 Δs_1 Δs_2 A_2 v_2

Abb. 162.4

Bei unterschiedlichem Querschnitt des Rohres folgt, dass die Strömungsgeschwindigkeiten verschieden sein müssen, die Volumina aber gleich sind.

$$A_1 \cdot \Delta s_1 = A_2 \cdot \Delta s_2$$

Die Division durch Δt ergibt den **Volumenstrom** $I = \frac{\Delta V}{\Delta t}$

$$I = \frac{A_1 \cdot \Delta s_1}{\Delta t} = \frac{A_2 \cdot \Delta s_2}{\Delta t}$$

Setzt man für Δs/Δt die Geschwindigkeiten v ein, erhält man

$I = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$, oder:

$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$ die **Kontinuitätsgleichung!**

Die Geschwindigkeiten v verhalten sich umgekehrt proportional zu den Querschnitten A. Oder anders ausgedrückt:

Die Strömungsgeschwindigkeit ist dort groß, wo der Querschnitt klein ist und umgekehrt. Dies wird auch als **Düsenprinzip** bezeichnet.

Merk & Würdig

Volumenstrom *I*, Fördermenge

$I = \frac{˝V}{˝t}$, $[I] = m^3/s$ V … Volumen t … Zeit, $[t] = s$

Kleiner Querschnitt – große Strömungsgeschwindigkeit

Kontinuitätsgleichung, Düsenprinzip:

$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$

v_1, v_2 … Geschwindigkeit der Strömung, $[v] = m/s$

A_1, A_2 … Querschnittflächen, $[A] = m^2$

Großer Querschnitt – kleine Strömungsgeschwindigkeit

Beispiel 7.7

Ein Feuerwehrschlauch hat einen Durchmesser von 7,5 cm. Das Wasser strömt darin mit einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s. Die Düse hat einen Durchmesser von 2,5 cm.

a) Wie hoch ist die Geschwindigkeit des Wassers, das aus der Düse spritzt?

b) Welche Fördermenge (Volumenstrom) wird erreicht?

a) $\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \Rightarrow v_2 = \frac{v_1 \cdot d_1^2}{d_2^2}$

Durch Einsetzen der Zahlenwerte erhält man:

$$v_2 = \frac{2{,}5\ \text{m/s} \cdot (7{,}5\ \text{cm})^2}{(2{,}5\ \text{cm})^2} = \mathbf{22{,}5\ m/s}$$

Das Düsenprinzip verzehnfacht fast die Geschwindigkeit!

b) Der Volumenstrom I ergibt sich mit:

$$I = A \cdot v = \frac{d^2\pi}{4} \cdot v = \frac{(0{,}075\ \text{m})^2\pi}{4} \cdot 2{,}5\ \text{m/s} = \mathbf{0{,}011\ m^3/s}$$

Das sind **11 l/s oder 663 l/min**.

Abb. 163.1

Übungen

Wenn du folgende Übungsbeispiele löst, kannst du zum Thema Geschwindigkeiten in Strömungen nach einer Analyse der Fragestellung Lösungsansätze aufstellen und Ergebnisse errechnen.

Ü 7.12 Durch ein **Lüftungsrohr** mit einem Durchmesser von 60 cm strömen 180 m³ Luft pro Minute. Berechne Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeit.

Ü 7.13 Ein Wasserleitungshahn wird für 20 s geöffnet. Dabei wird ein 12 l-Kübel gefüllt.

a) Welcher Volumenstrom und welche Fördermenge (in Liter pro Minute) wird erreicht?

b) Berechne die Strömungsgeschwindigkeit in einem 1-Zoll-Rohr (1″ = 25,4 mm).

Ü 7.14 Welche Austrittsgeschwindigkeit erzielt eine **Feuerwehrhochdruckdüse** mit einem Düsendurchmesser von 1,4 cm? Im Feuerwehrschlauch (Durchmesser 3 cm) beträgt die Geschwindigkeit des Wassers 4 m/s.

Ü 7.15 **Wasserstrahlschneiden:** Durch eine Saphirdüse (Durchmesser 0,12 mm) einer Hochleistungs-Wasserstrahlpumpe zum Schneiden von Kunststoff wird Reinwasser mit einer Geschwindigkeit von 650 km/h gepresst. Welchen Durchmesser muss die Zuleitung zumindest aufweisen, damit eine Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s nicht überschritten wird?

Die Arbeit W wird längs des Weges Δs gegen den Druck p verrichtet.

Abb. 164.1 *Wird der Kolben um den Weg Δs verschoben, dann verrichtet er **Arbeit W**.*

Merk & Würdig

Bernoulligleichung:

$$p_1 + ° \frac{v_1^2}{2} = p_2 + ° \frac{v_2^2}{2} = p_{ges} = const.$$

Der Gesamtdruck p_{ges} in einem bewegten idealen Fluid ist konstant.

Staudruck:

$$p_{Dyn} = ° \frac{v^2}{2}$$

p_1, p_2 … Statischer Druck (normal zur Strömungsrichtung gemessen), $[p] = Pa$

p_{Dyn} … Staudruck, hydrodynamischer Druck, $[p_{Dyn}] = Pa$

ρ … Dichte des Fluids, $[\rho] = kg/m^3$

Beachte: Eine Luftströmung ist **keine ideale Strömung**. Die Ergebnisse obiger Bernoulligleichung können aber in vielen Fällen auch für Gase als gute Näherung übernommen werden.

Abb. 164.3 ***Prandtl-Staurohr***

7.2.2 Druck in Strömungen (Bernoulligleichung)

(dynamic pressure of a fluid)

In einer ruhenden Flüssigkeit wirkt der Druck in allen Richtungen gleich. In einer strömenden Flüssigkeit gilt dies nicht mehr: In Strömungsrichtung wirkt durch die Strömung eine **zusätzliche Druckkraft**. Eine Strömung enthält an jeder Stelle zumindest zwei verschiedene Arten von Energie,

– die Druckenergie und
– die kinetische Energie.

Tabelle 164.2 *Strömende Flüssigkeit*

Die **Druckenergie** kann durch die Arbeit erklärt werden, die beim Verschieben eines Kolbens gegen die Druckkraft verrichtet wird **(siehe Abb. 164.2)**:

$W = F \cdot ˝s = p \cdot A \cdot ˝s = p \cdot ˝V$

Dies ist die in der Strömung im Volumen ΔV enthaltene **Druckenergie**.

Für waagrecht fließende Strömungen ist die Gesamtenergie die Summe aus Druckenergie und der im Volumen ΔV enthaltenen kinetischen Energie. Die Summe der Energien muss nach dem Energieerhaltungssatz konstant bleiben; daher gilt für zwei verschiedene Stellen der Strömung **(siehe Abb. 164.2)**:

$$p_1 \cdot \Delta V_1 + \frac{\Delta m \cdot v_1^2}{2} = p_2 \cdot \Delta V_2 + \frac{\Delta m \cdot v_2^2}{2}$$

Für ideale Flüssigkeiten ist das Volumen $° V_1 = ° V_2 = ° V$ konstant. Die Gleichung wird durch $° V$ dividiert:

$$p_1 + \frac{\Delta m \cdot v_1^2}{\Delta V \cdot 2} = p_2 + \frac{\Delta m \cdot v_2^2}{\Delta V \cdot 2}$$

Der Ausdruck $\frac{\Delta m}{\Delta V}$ ist die Dichte ρ des Fluids. Damit ergibt sich die

Bernoulligleichung: $p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} = p_{ges} = const.$

Interpretation:

- Die Summe der Drücke $p_1 + ° \frac{v_1^2}{2}$ ist der Gesamtdruck p_{ges}.
- Der Gesamtdruck bleibt konstant!
- Der Gesamtdruck wird in Stromlinienrichtung gemessen.
- Der Gesamtdruck ist gleich dem (statischen) Druck in einer ruhenden Flüssigkeit.
- Der statische Druck wird normal auf die Stromlinien gemessen.
- Der **Staudruck** oder **hydrodynamische Druck** $p_{Dyn} = ° \frac{v^2}{2}$ ist von der Geschwindigkeit abhängig.

Daher ermöglicht die Ermittlung dieses Drucks eine **Geschwindigkeitsmessung** mit dem so genannten **Prandtl-Staurohr (siehe Abb. 164.3)**.

Der Staudruck ist die Differenz zwischen Gesamtdruck (durch Messung in Strömungsrichtung) und statischem Druck (durch Messung normal auf die Strömung). Die Differenzdruckmessung ergibt also den Staudruck. Aus der Größe des Staudrucks kann auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden.

Eine wichtige Anwendung ist die Geschwindigkeitsmessung von Flugzeugen. Mit dem Staurohr ermittelt man die **Relativgeschwindigkeit** zwischen Strömung und Flugzeug. Diese ist für das Flugverhalten und für den Treibstoffverbrauch besonders wichtig.

Beispiel 7.7

Geschwindigkeitsmessung mit einem **Staurohr** (siehe Abb. 165.1), das an der Nase eines Flugzeugs montiert ist. Die Druckmessung mittels Manometer ergibt einen Differenzdruck von1,7 kPa. Welchen Wert muss die Geschwindigkeitsanzeige in der Pilotenkanzel diesem Druck zuordnen? ($\rho = 1{,}3$ kg/m³)

Der Differenzdruck ist der Staudruck: $p_{Dyn} = \rho \frac{v^2}{2}$

Damit ergibt sich die Geschwindigkeit v:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{Dyn}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}7 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{1{,}3 \text{ kg/m}^3}} = 51 \text{ m/s} = \mathbf{184\ km/h}$$

Abb. 165.1 ***Prandtl-Staurohr*** *an einer Flugzeugnase*

Experiment

Diese Experimente kannst du selbst machen!

Abb. 165.2 ***Aerodynamisches Paradoxon I:*** *Bläst du über ein Blatt Papier, so wird es nicht vom Luftstrom hinuntergedrückt, sondern angehoben.*

Erklärung: *Über dem Papierblatt fällt der statische Druck (Sogwirkung) und der äußere Luftdruck drückt das Papierblatt hoch.*

Abb. 165.3 ***Aerodynamisches Paradoxon II:*** *Halte ein Papierblatt über einen Karton und blase in den Zwischenraum. Der statische Druck zwischen den Blättern ist wegen der Sogwirkung klein. Der äußere Luftdruck drückt die Blätter zusammen. Die Luft kann nur mehr stoßweise durchströmen. Ganz ähnlich funktioniert das Schnarchen. Dabei wird durch die Umströmung des Gaumensegels ein mehr oder weniger lautes Flattern ausgelöst …*

- **Aero- und hydrodynamisches Paradoxon:** Bei einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit
  - steigt der Staudruck und
  - sinkt im gleichen Maß der statische Druck (sonst wäre die Bernoulligleichung nicht erfüllt!).

  An **Engstellen** sinkt der statische Druck, schließlich ist die Geschwindigkeit dort höher, wo der Rohrquerschnitt kleiner ist! (Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten kann der Druck sogar unter den äußeren Luftdruck sinken.)

  Dieser Effekt wird **hydrodynamisches Paradoxon** und bei Gasen **aerodynamisches Paradoxon** genannt.

Auswirkungen:

- Sogwirkung in starken Strömungen: Bei Hochwasser führenden Flüssen kann es zu gefährlichen Situationen kommen. Durch den geringen statischen Druck im Bereich der schnellsten Strömung wirkt ein Sog (also eine Kraft) genau dorthin, wo die Fließgeschwindigkeit größer ist. Das kann auch für gute Schwimmer lebensbedrohlich werden.
- Die aerodynamische Auftriebskraft erklärt, wie Flugzeuge fliegen (siehe Kapitel 7.2.4).
- Zerstäuberprinzip: (siehe Abb. 165.4)

Die Luft wird über das Steigrohr geblasen, … … es entsteht ein Unterdruck und … … der äußere Luftdruck drückt die Flüssigkeit im Steigrohr hoch.

Abb. 165.4 ***Zerstäuberprinzip:*** *Farbspritzpistolen und Vergaser einfacher Benzinmotoren nützen dieses Prinzip.*

Beispiel 7.9

Sogwirkung bei einem Flachdach:

Über eine Dachfläche von 12 m · 22 m fegt ein Sturm (v = 90 km/h).

a) Wie groß ist der Staudruck?

b) Wie groß ist der statische Druck?

c) Mit welche Kraft wird die Dachfläche nach oben gedrückt? (Windrichtung parallel zum Dach, Luftdruck 1 015 mbar, Dichte der Luft 1,3 kg/m^3)

a) Staudruck: $p_{Dyn} = \rho \frac{v^2}{2} = 1{,}3\ \text{kg/m}^3 \cdot \frac{(25\ \text{m/s})^2}{2} = \mathbf{406\ Pa}$

b) Der Gesamtdruck in der Strömung ist der Luftdruck. Der statische Druck ist die Differenz zum Gesamtdruck. Dieser drückt von oben senkrecht auf das Dach:

p = 1015 mbar – 4,06 mbar = **1 011 mbar**

c) Von unten drückt ebenfalls der Luftdruck. Daher ist die Differenz zwischen dem statischen Druck und dem Luftdruck, also die errechneten 4,06 mbar, für eine Kraft verantwortlich, die die Fläche nach oben drückt:

$F = p \cdot A = 406\ \text{Pa} \cdot 264\ \text{m}^2 = \mathbf{107\ kN}$

Das Dach muss also gut verankert sein!

Übungen

Im Folgenden testest du zum Thema Bernoulligleichung deine Fähigkeiten in Analyse und Berechnung an Hand naturwissenschaftlicher Fragestellungen.

Ü 7.16 Flugzeug: Welche Druckdifferenz kann im Prandtl-Staurohr einer Fluggeschwindigkeit von 650 km/h zugeordnet werden? (Dichte der Luft 0,78 kg/m^3)

Ü 7.17 Garage: Welche Kraft drückt bei starkem Sturm (v = 110 km/h) eine Dachfläche (2,3 m · 4 m) von unten hoch? (Windrichtung parallel zum Dach, Luftdruck: 1 013 mbar)

Ü 7.18 Teste dich selbst! Wenn du 5 Punkte erreichst, dann weißt du über die Bernoulligleichung und über das aerodynamische Paradoxon gut Bescheid!

a) Welche Sätze beschreiben Zusammenhänge in strömenden Fluiden richtig?

- ☐ Der statische Druck ist immer null, wenn die Strömungsgeschwindigkeit null ist.
- ☐ Der Gesamtdruck ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit.
- ☐ Der Druck in einer bewegten Flüssigkeit wirkt in alle Richtungen gleich stark.
- ☐ Der dynamische Druck steht in einem quadratischen Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit.
- ☐ Der Gesamtdruck ist unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Er wird in Strömungsrichtung gemessen.

b) Mit Hilfe des dynamischen Drucks misst man in Flugzeugen Geschwindigkeiten. Man misst

- ☐ die Geschwindigkeit relativ zur umgebenden Luftschicht.
- ☐ die Geschwindigkeit relativ zum Boden.
- ☐ eine absolute Geschwindigkeit.

c) Welche Aussagen über das aero- bzw. hydrodynamische Paradoxon sind korrekt?

- ☐ Mit Hilfe des Paradoxons kann geklärt werden, warum es bei Sturm manchmal ganze Dächer abhebt.
- ☐ Das Zerstäuberprinzip funktioniert auch im luftleeren Raum.
- ☐ Die Bernoulligleichung beruht auf dem EES.
- ☐ Das hydrodynamische Prinzip funktioniert nicht mit Flüssigkeiten, da diese inkompressibel sind.

Mehrfachantworten möglich.

7.2.3 Strömungswiderstand *(flow resistance)*

Monika fährt mit dem Fahrrad gegen den Wind. Sie muss sich ziemlich anstrengen! Die Kraft, die Monika spürt, nennt man **Strömungswiderstand**[1] bzw. **Luftwiderstand F_w**. Der Strömungswiderstand ist abhängig von

- der **Größe** des Körpers, der umströmt wird. Die Größe des Körpers wird durch die Schattenfläche A **(siehe Abb. 167. 2)** angegeben.
- der **Form** des Körpers, auf den die Strömung wirkt. Die geometrische Form ist im **Widerstandsbeiwert c_w** berücksichtigt. Sein Wert hängt auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers ab. Er kann experimentell ermittelt werden **(siehe Tabelle 167.1)**.
- dem **dynamischen Druck** $\rho \cdot \frac{v^2}{2}$, der in der Strömung herrscht.

Strömungswiderstand F_w: $F_w = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$

Abb. 167.2 *Im Windschatten von Monika wird die Luft verwirbelt. Damit wird die kinetische Energie der Strömung erhöht. Diese Energie muss Monika aufbringen.*

Abb. 167.1 *Umströmung einer Kugel. Ab einer gewissen Geschwindigkeit kommt es zur Wirbelbildung (turbulente Strömung). In den Wirbeln ist kinetische Energie enthalten.*

Typische Werte für c_w

Körper	Form	Widerstandsbeiwert c_w
Kugelschale	→	1,4 – 1,6
Kreisscheibe	→	1,1
Kugel	→	0,45 für kleine v 0,2 für große v
Kugelschale	→	0,4
Stromlinienkörper	→	0,05
Auto	→	0,3 – 0,4

Tabelle 167.1

- **Energie und Leistung:**

  Wenn Monika gegen den Luftwiderstand F_w einen Weg s zurücklegt, dann verrichtet sie Arbeit $W = F_w \cdot s$.

  Diese Arbeit ist in Form von **kinetischer Energie** in der Luftströmung und in den Luftwirbeln enthalten, die sie in ihrem Windschatten erzeugt hat. Ein Teil wird natürlich auch in Wärme umgewandelt.

  Welche Leistung benötigt Monika, um gegen den Luftwiderstand anzukämpfen?

  Aus Kapitel 5 kennen wir die Beziehung zwischen Leistung P und Kraft F bei einer Geschwindigkeit v: $P = F \cdot v$. Setzt man den Luftwiderstand ein, ergibt sich:

  $$P = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2}, \Rightarrow P \sim v^3$$

  Die **Leistung**, die Monika zur Überwindung des Luftwiderstandes benötigt, wächst mit der **dritten Potenz der Geschwindigkeit**. (Zusätzlich muss sie noch die Rollreibung überwinden und eventuell eine Leistungsreserve für eine Beschleunigung aufbringen.)

Merk & Würdig

Luftwiderstand, Strömungswiderstand F_w:

$$F_w = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}, \; [F_w] = N$$

Leistung P zum Überwinden des Luftwiderstandes (Strömungswiderstandes):

$$P = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2}, \Rightarrow P \sim v^3$$

c_w … Widerstandsbeiwert, $[c_w] = 1$
ρ … Dichte des Fluids, $[\rho] = kg/m^3$
v … Geschwindigkeit, $[v] = m/s$
A … Querschnitt (Schattenfläche), $[A] = m^2$
P … Leistung, $[P] = w$

Beispiel 7.10

Welche **Leistung** muss ein Pkw zumindest aufbringen, um den Luftwiderstand zu überwinden? Geschwindigkeit 130 km/h, $c_w = 0{,}31$; $A = 1{,}9\ m^2$

$$P = F_w \cdot v = c_w \cdot A \cdot \rho \frac{v^3}{2} = 0{,}31 \cdot 1{,}9\ m^2 \cdot 1{,}3 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{(36{,}1\ m/s)^3}{2} = \mathbf{18\ kW}$$

Der Automotor muss zusätzlich Leistung zum Überwinden der Rollreibung und eventuell eine Leistungsreserve für eine Beschleunigung (Überholmanöver) aufbringen.

[1] Die Zusammenhänge in diesem Kapitel gelten erst ab Geschwindigkeiten, bei denen Turbulenzen auftreten (turbulente Strömung).

Ergänzung & Ausblick

Laminar oder turbulent?

Turbulente Strömungen enthalten Wirbel und in Wirbeln steckt kinetische Energie! Turbulente Strömungen haben daher einen höheren Luftwiderstand. Gerade im Autobau ist man folglich bestrebt, Wirbelbildung möglichst zu vermeiden. So kann z. B. durch stromlinienförmige Formgebung einer Karosserie der turbulente Bereich zu höheren Geschwindigkeiten verschoben werden. Dadurch erniedrigt sich der c_w-Wert.

Der Weg zu möglichst geringem Strömungswiderstand ist mühsam:

1) **Das Experiment**, also der Test im **Windkanal**: Dies ist leider nicht immer möglich. Z. B. ist es schwer, einen Airbus im Maßstab 1:1 zu bauen und im Windkanal zu testen. (Kleinere Modelle verhalten sich außerdem im Strömungskanal anders als größere.)
2) **Simulation:** Am Computer wird seit Jahrzehnten unermüdlich mit immer besseren mathematischen Modellen gerechnet und simuliert.

Abb. 168.1 *Flugzeugmodell im* ***Windkanal***

Übungen

Im Folgenden testest du zum Thema Strömungswiderstand, ob du fähig bist, naturwissenschaftliche Probleme zu analysieren und Lösungen zu ermitteln.

Ü 7.19 **Fallschirmsprung:** Analysiere die Bewegung in Abb. 168.2.

a) Beschrifte die Momentaufnahmen des Fallschirmspringers mit den Buchstaben des Diagramms.

b) Bezeichne die eingezeichneten Kräfte mit den Fachausdrücken.

c) Beschreibe mit eigenen Worten, warum sich manche Kräfte ändern. Verwende dazu die physikalischen Größen, die in der Beziehung für den Luftwiderstand vorkommen.

Ü 7.20 **Parabolantenne:** Welche Kraft wirkt bei einer Windgeschwindigkeit von 180 km/h auf eine Satellitenschüssel? (Die dem Wind ausgesetzte Fläche ist kreisförmig mit $d = 90$ cm, $c_w = 1{,}3$, $\rho = 1{,}3$ kg/m³)

Ü 7.21 **Umweltfreundlich:** Um wie viel Prozent sinkt der Strömungswiderstand eines Fahrzeuges, wenn die Geschwindigkeit von 150 km/h auf 80 km/h reduziert wird?

Ü 7.22 **Versicherungsfall:** Eine Plakatwand mit den Ausmaßen (3m · 5m) wird bei einem Sturm umgeworfen. Die Untersuchung zeigt, dass eine Kraft von 6 kN dazu nötig war.

Welche Geschwindigkeit hat der Sturm zumindest erreicht, wenn man annehmen kann, dass nur der Luftwiderstand gewirkt hat? ($c_w = 1$, $\rho = 1{,}3$ kg/m³)

Ü 7.23 Ein **Lkw** fährt 110 km/h. ($A = (2 \times 3{,}5)$ m², $c_w = 0{,}43$, $\rho = 1{,}3$ kg/m³)

a) Wie groß ist der Luftwiderstand?

b) Berechne die Arbeit, die nötig ist, um 300 km auf ebener Straße zurückzulegen. (Der Rollwiderstand ist nicht vernachlässigbar; nimm eine Kraft von 1 500 N dafür an.)

Ü 7.24 ***Power:*** *How much power needs to be delivered to the wheels of a car travelling at a typical motorway speed of 38 m/s?*

(Data: At this speed, rolling friction is not relevant; the car has a cross-sectional area of 1,8 m²; the density of air is 1,3 kg/m³, the drag coefficient of the car is 0,4)

„drag coefficient“ = „Luftwiderstandsbeiwert“

Abb. 168.2 *Zu Ü 7.19*

Ergänzung & Ausblick

Bionik

Die Bionik ist ein Wissenschaftszweig, der versucht, technische Lösungen **der Natur** abzuschauen:

- Das Anbringen einer **delphinartigen** Schnauze am Schiffsbug senkt den Treibstoffverbrauch von Schiffen wesentlich.
- Raffinierte Feuerwehrleute fertigten einen Feuerwehrschlauch an, der an der Innenseite ein Gleitmittel hat, das den Strömungswiderstand verringert. Auf eine ähnliche „Idee" kam der **Hecht** schon viel früher. An seiner Oberfläche befindet sich ein Gleitfilm, der ihn bis zu 2/3 schneller werden lässt (bei gleichem Energieaufwand).
- Über Untersuchungen an **Vogel˜ ügeln** ist man zur Erkenntnis gekommen: Kleine Wirbel, ausgelöst durch die geringen Unebenheiten der Federn, senken den Strömungswiderstand, da auf ihnen die Luft wie auf einem Kugellager weitergeleitet wird.

7.2.4 Dynamischer Auftrieb *(aerodynamic lift)*

Wie ˜ iegt ein Flugzeug?

Unsere Erkenntnisse der letzten Kapitel helfen bei der Antwort.

- Im Stromlinienbild **Abb. 169.2** ist zu erkennen, dass die Luft an der Oberseite schneller strömt als an der Unterseite.
- Auf der Oberseite ist daher der dynamische Druck größer als an der Unterseite.
- Der Gesamtdruck bleibt laut **Bernoulli** konstant!
- Daher muss der statische Druck oben geringer sein als auf der Unterseite.
- Von oben wirkt eine geringere Kraft auf das Flugzeugprofil als auf die Unterseite.
- Die **resultierende Kraft ist eine Auftriebskraft.**

Abb. 169.1 *Im Windkanal gemessene **Stromlinien** zeigen: Die Stromlinien liegen oben dichter aneinander, die Luft strömt oben tatsächlich schneller.*

Abb. 169.2 *Die Luft strömt oberhalb des Flügels schneller als unterhalb. Die unterschiedlichen Werte des dynamischen und statischen Drucks entlang des Flugprofils führen zu den skizzierten Zonen des Über- und Unterdrucks und zur Auftriebs- und Widerstandskraft.*

Abb. 169.3 *Auf ein Flugzeug wirken im Wesentlichen **vier Kräfte**:*
1) Gewicht
2) Auftrieb
3) Strömungswiderstand
4) Vortrieb (durch Propeller oder Strahltriebwerke).
5) Die Resultierende von Strömungswiderstand und Auftrieb wird als Luftkraft bezeichnet.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die aerodynamische Auftriebskraft eines Profils abhängt von

- Form und Anstellwinkel
- Größe der Tragflügel
- Dichte der Luft
- Quadrat der Geschwindigkeit

Abb. 169.4 ***Heckspoiler:*** *Das Wort Auftrieb verleitet dazu, diese Kraft immer nach oben gerichtet zu denken; sie kann aber selbstverständlich in jede beliebige Richtung wirken. Man denke z. B. an den Heckspoiler eines Formel-I-Autos, bei dem der Auftrieb einen höheren Anpressdruck auf den Asphalt bewirkt und als **Abtrieb** bezeichnet wird.*

- **Der Magnus-E° ekt[1]:**

  Durch Reibungseffekte wird die Luft nahe der Oberfläche eines rotierenden Körpers mitgenommen **(siehe Abb. 170.1)**. Das Stromlinienbild eines solchen rotierenden Objekts zeigt eine höhere Geschwindigkeit auf einer Seite, ähnlich wie die Unsymmetrien der Strömung um eine Tragfläche. Folglich ist eine Kraft zu erwarten. Diese Kraft wirkt normal auf Achsen- und Strömungsrichtung.

  E° et, Spin: Der Magnus-Effekt ist uns insbesondere aus dem Ballsport geläufig. Die seltsamen Flugbahnen von **„angeschnittenen" Bällen** im Fußball, Tennis und Tischtennis sind auf den Magnuseffekt zurückzuführen.

Abb. 170.1 ***Magnuse¸ ekt****: Der rotierende Körper fliegt nach links. Durch die Drehbewegung wird die Luftströmung unsymmetrisch: Oben ist die Geschwindigkeit größer. Analog einem Flugzeugprofil wirkt auf Grund der statischen Druckverteilung eine Kraft F nach oben.*

FLETTNER-ROTOR

Corbis.com

Abb. 170.2 *1925 überquerte das Schiff den Atlantik. Mit Hilfe des* ***Magnuse¸ ekts*** *wurde mit rotierenden Zylindern der Vortrieb erzeugt (Flettnerrotoren).*

Übungen

Ü 7.25 Im Folgenden testest du zum Thema aerodynamischer Auftrieb, ob du fachgerecht Vorgänge in der Natur beschreiben kannst. Wenn du mehr als 7 Punkte erreichst, dann weißt du über das Thema Auftrieb gut Bescheid!

a) Welche Sätze beschreiben die Zusammenhänge richtig?

- ☐ Wenn der aerodynamische Auftrieb größer als die Gewichtskraft ist, dann steigt das Flugzeug.
- ☐ Wenn die Strömungsgeschwindigkeiten über und unter dem Flügelprofil vollkommen gleich sind, dann ist die Auftriebskraft nach oben gerichtet.
- ☐ Ohne eigenen Antrieb durch Propeller oder Turbine kann keine Vortriebskraft und damit kein Auftrieb erzeugt werden.
- ☐ Die aerodynamischen Kräfte an dem Heckspoiler eines Sportwagens sollen Auftriebskräfte bewirken, damit das Fahrzeug nicht so schwer ist.

b) Die Auftriebskraft ist

- ☐ vom Luftdruck im Flugzeug abhängig.
- ☐ von der Masse des Flugzeuges abhängig.
- ☐ von der Fläche des Auftriebskörpers abhängig.
- ☐ vom Anstiegswinkel des Flügelprofils abhängig.

c) Wenn auf ein Flügelprofil kein Luftwiderstand wirkt, dann

- ☐ kann ein extrem großer Auftrieb erzeugt werden, da das Profil die Luftströmung ideal verformt.
- ☐ gibt es keinen Auftrieb.
- ☐ steht das Flugzeug am Flughafen.
- ☐ fliegt das Flugzeug mit idealem Treibstoffverbrauch.

d) Ein Tischtennisball fliegt nach rechts. Er dreht sich so wie in **Abb. 170.1** im Uhrzeigersinn. (Mache eine Skizze der Situation und der Strömung!) Die Auftriebskraft durch den Magnuseffekt wirkt

- ☐ nach oben.
- ☐ entgegengesetzt zur Flugrichtung.
- ☐ nach unten.
- ☐ in Richtung des Luftwiderstandes.

e) An einem Tennisball wirkt die „Auftriebskraft" des Magnuseffekts nach unten. Daraus folgt:

- ☐ Diese Kraft wird auch als Vortriebskraft bezeichnet.
- ☐ Dann spricht man von Abtrieb.
- ☐ Die Wurfparabel wird flacher.
- ☐ Die Wurfparabel wird steiler.

Mehrfachantworten möglich.

[1] HEINRICH GUSTAV MAGNUS, (1802 Berlin – 1870 Berlin), deutscher Physiker und Chemiker; lehrte ab 1834 Physik in Berlin; entdeckte 1852 den Magnuseffekt. Die Anwendung als Schiffsantrieb (Flettnerrotor) blieb wegen Unwirtschaftlichkeit ohne Erfolg.

Thema & Gesellschaft

Der Traum vom Fliegen

ist vermutlich so alt wie die Menschheit selbst. Und er hat mit der **Sehnsucht nach Freiheit** zu tun …

Diesen Traum hat schon IKARUS geträumt, wie es in der **griechischen Mythologie** erzählt wird: Ikarus wurde auf Kreta gefangen gehalten. Er wagte die Flucht mit selbst hergestellten Flügeln aus Vogelfedern. Dabei kam er der Sonne zu nahe. Seine Flügelfedern waren durch Wachs zusammengehalten, … und aus war der Traum!

Den Traum vom Fliegen hatte auch OTTO LILIENTHAL. Ihm gelang mit seinen Gleitflugexperimenten die Entwicklung im Flugzeugbau entscheidend weiter zu führen. Otto Lilienthal war länger in der Luft als alle Menschen vor ihm zusammen. Doch auch er hat seine Grenzen überschritten. Er stürzte aus fünfzehn Metern Höhe ab und starb im Jahr 1896 an gebrochenem Rückgrat.

Der Traum vom Fliegen wird weiter geträumt

- von noch größeren Flugzeugen,
- von noch schnelleren Flugzeugen,
- vom Flug in die Karibik,
- vom Flug zum Mars, …

Eine Kunst ist es, beim Träumen den Boden nicht ganz unter den Füßen zu verlieren …

Abb. 171.1 *OTTO LILIENTHAL, 1894; Gleitflug*

Ergänzung & Ausblick

Aerodynamische (Auftriebs-)Kräfte in Aktion:

- **Propeller (Luftschraube):** Das Profil eines Propellerblattes ist dem eines Tragflügels ähnlich. Die Auftriebskräfte bei der Drehung ergeben den Vortrieb oder Antrieb.
- **Hubschrauber:** Die **Rotorblätter** haben ein Tragflächenprofil. Es ergeben sich durch die umströmende Luft, so wie beim Propeller, Auftriebskräfte bzw. Antriebskräfte.
- **Schwimmen:** Zur Fortbewegung im Wasser, z. B. von Fischen, werden häufig Ruderbewegungen oder Schwanzflossenbewegungen eingesetzt. Diese nützen die aerodynamischen Kräfte so aus, dass sie zu einer Beschleunigung in die gewünschte Richtung führen.
- **Turbine:** Die aerodynamischen Kräfte auf die Turbinenschaufeln sind für die optimale Funktion von Turbinen und Windrädern von großer Bedeutung.

Thema & Gesellschaft

Energiegewinnung aus Strömungen:

Windenergie: In strömenden Fluiden ist **kinetische Energie** und Druckenergie enthalten.

Die in diesem Kapitel besprochenen Druckkräfte am umströmten Rotor erzeugen ein Drehmoment und damit eine Rotationsenergie. In Windkraftwerken wird diese Rotationsenergie im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Sie entspricht – je nach Windgeschwindigkeit – zu etwa 30 bis 40 Prozent der kinetischen Energie, die in einem bestimmten Volumen der anströmenden Luft enthalten ist. Für Wasserturbinen gelten analoge Erklärungen, allerdings können dort mehr als 90 % der im Wasser enthaltenen Energie in Strom umgewandelt werden.

Nachhaltigkeit: Die drei wichtigsten Punkte der Nachhaltigkeit sind:

Punkt A Umweltverträglichkeit

Punkt B Soziale Verträglichkeit

Punkt C Wirtschaftlichkeit

Bei der Nutzung von Windkraftwerken sind diese drei Punkte gut erfüllt:

- Im Vergleich zu Erdöl hat die Windenergie bei ihrer Nutzung keinen Einfluss auf den Treibhauseffekt und damit auf das Klima (Punkt **A**).
- Wasser- und Windenergie gehören zu den **erneuerbaren (regenerativen) Energiequellen**. Sie beeinträchtigen nicht die zukünftige Verfügbarkeit wichtiger Rohstoffe durch die nachfolgenden Generationen (Punkt **B**).
- Die Wirtschaftlichkeit von Windkraftwerken ist vor allem abhängig vom Jahresdurchschnitt der Windgeschwindigkeit und von der Größe der Anlage. In vielen Regionen Deutschlands aber auch Österreichs ist die Wirtschaftlichkeit gegeben. Steigt der Ölpreis, dann sind Windkraftwerke auch in nicht optimaler Lage effizient. (Punkt **C**)

Weltweit erlebt die Windenergie ein rasantes Wachstum. In nicht allzu ferner Zukunft wird die Windkraft einen bedeutenden Anteil an der globalen Stromversorgung liefern. Windenergie gehört zu den am schnellsten wachsenden Wirtschaftsbranchen: Global wächst die Stromproduktion aus Wind derzeit pro Woche um 44 GW, der Leistung eines großen Kraftwerks. China erzeugt mittlerweile den meisten Windstrom.

Ein Argument gegen die Windenergie: Windkraft steht nicht immer zur Verfügung. In Zeiten, in denen kein Wind bläst, müssen daher Reservekapazitäten (z. B. Gaskraftwerke) zur Verfügung stehen. Dies ist nicht wirtschaftlich (Punkt **C**). Analoges gilt für die Stromgewinnung aus Sonnenenergie. Dieses Problem kann man durch **Speichern** und **Einsparen** von Energie lösen.

Energie speichern: Es gibt Möglichkeiten, den Strom zu speichern. Dies ist in Österreich relativ einfach, da in den Alpen Pumpspeicherkraftwerke gebaut wurden und werden. Diese sind allerdings nicht sehr umweltverträglich (Punkt **A**), da sie zumeist wunderschöne Hochgebirgstäler „verschandeln" und so dem Naturschutzgedanken widersprechen!

Abb. 172.1 *Die **Umweltbeeinträchtigung** durch ein Windkraftwerk wird als gering erachtet.*

Positiv:

- Geringe Klimabeeinflussung (kein CO_2)
- Kleines Gefahrenpotential
- Der Wind weht gratis!

Negativ:

- Geräuschemission (bei neuen Kraftwerken gering)
- Gefahr für Vögel (Neue Untersuchungen zeigen, dass dieses Problem für die meisten Standorte als gering eingestuft werden kann.)
- Optische Beeinträchtigung
- Der Wind ist nicht immer verfügbar. Er weht wo, wann und wie viel er will!
- Das Leitungsnetz wird verstärkt belastet und muss ausgebaut werden.
- Windkraftwerke sind teuer.

Abb. 172.2 *Im **Stromlinienbild** erkennt man, dass die Windgeschwindigkeit nach dem Rotor geringer ist. (Die Stromlinien liegen dort weiter auseinander.) Die kinetische Energie, die der Luftströmung entzogen wurde, wird durch den Rotor und den Generator in elektrische Energie umgewandelt.*

Energie sparen: Zuletzt kann man noch anführen, dass man Strom sparen soll. Dies „probiert" man schon seit Jahrzehnten (mit dem „Erfolg", dass der Stromverbrauch jährlich um 2 % steigt).

Und er wird noch weiter steigen, weil

- mehr Wärmepumpen für Klimaanlagen verwendet werden, um Öl und Gas einzusparen (Punkt **A** und **B**),
- der Autoverkehr die Entwicklung zur Elektromobilität einschlägt,
- die Wirtschaft weiter wachsen wird – um Arbeitsplätze zu sichern (Punkt **B**). Auch das erhöht den Stromverbrauch!

Die Situation in Österreich:

Die bedeutendste erneuerbare Energiequelle in **Österreich** ist die Wasserkraft. Sie hat einen Anteil von ca. 60 % an der elektrischen Energie. Die sogenannten „Sonstigen Energieträger" (vor allem Biomasse, Windenergie und Photovoltaik) haben einen Anteil von etwa 10 % – Tendenz steigend! Damit zählt Österreich weltweit zur Spitze jener Länder, die ihre Energieversorgung in hohem Maße auf diese umweltfreundlichen Energiequellen stützen und liegt hinter Norwegen und Schweden an dritter Stelle in Europa.

Grundlagen

Ü 1.1
a) $8 \cdot 10^{-7}$ m
b) 10^{8} Hz
c) $8 \cdot 10^{11}$ Byte
d) 0,17 kg

Ü 1.2
a) $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ W
b) $3{,}4 \cdot 10^{4}$ J
c) $9{,}5 \cdot 10^{-8}$ m
d) $7 \cdot 10^{5}$ Hz

Ü 1.3 Ja

Ü 1.4 Z. B. 500 Schüler ⇒ 4 Waggons; Masse der Schüler m = 30 t; Platzangebot für einen Schüler: 0,36 m^2 = $(0{,}6 \cdot 0{,}6)$ m^2

Ü 1.5 Z. B. 1 000 Einwohner ⇒ 500 Haushalte ⇒ 300 Christbäume ⇒ 3 000 Kerzen

Ü 1.6 80 mmHg = 0,105 bar = $0{,}105 \cdot 10^{5}$ Pa
0,125 bar; 0,158 bar; 0,21 bar

Ü 1.7
a) 13 km/l
b) 12,5 l/100 km

Ü 1.8 Anzahl

Ü 1.9 50 Signale

Ü 1.10 Maßband, Uhr, Balkenwaage

Ü 1.11

Schiebelehre	–	kleine Distanzen
Fahrtenschreiber	–	Geschwindigkeit
Messzylinder	–	Volumen
Kompass	–	Richtung
Wasserwaage	–	horizontale Ausrichtung
Federwaage	–	Kraft
Pyknometer	–	Volumen
Chronometer	–	Zeit
Sextant	–	Winkel
Gnomon	–	Zeit, Sonnenstand
Lot	–	senkrechte Ausrichtung
Pipette	–	Volumen
Schlauchwaage	–	horizontale Ausrichtung
Mikrometerschraube	–	kleinste Strecken

Ü 1.12 Die Messgenauigkeit nimmt im Laufe der Zeit zu.

Ü 1.13
a) 20 mph = 32,18 km/h; 40 mph = 64,36 km/h; 60 mph = 96,54 km/h; 80 mph = 128,72 km/h
b) **i)** 20 mph, **ii)** ≈ 72 mph
c) No

Ü 1.14
a) Die Temperatur steigt nicht mehr.
b) Gashahn zurückdrehen, da keine weitere Erwärmung.
c) In den ersten fünf Minuten Temperaturanstieg, dann Halten der Temperatur.

Ü 1.15 mit ca. 65 Jahren

Ü 1.16 u = 40 024 km; A = $5 \cdot 10^{8}$ km^2; O = $1{,}08 \cdot 10^{12}$ km^3

Ü 1.17 300 000 km/s; $1{,}08 \cdot 10^{9}$ km/h; 30 cm/ns

Ü 1.18 0,02 s; 100 000 a

Ü 1.19 7,860 kg/dm^3; 786 dag/dm^3; 7,860 g/cm^3

Ü 1.20 $8{,}6 \cdot 10^{49}$ Atome

Ü 1.21 4 800 000 m^3 = 4 800 000 t

Ü 1.22 0,3 mm

Einführung

Ü 2.1 Der amerikanische Politiker Benjamin Franklin führte den Begriff Elektrizitätsmenge Q oder elektrische **Ladung** (*electric charge*) ein. Sein Labor war zumeist die Natur und das Naturphänomen, das ihn am meisten beschäftigte, konnte ziemlich gefährlich werden: Ein **Gewitter.**
Er entdeckte, dass es zwei Ladungsarten geben musste und nannte sie **positive** und **negative** Ladung. Heute wird die SI-Einheit der Elektrizitätsmenge Q nach dem französischen Physiker **Coulomb** (C) genannt. Im Atom findet man die kleinsten Ladungszahlen: Die Ladung eines Elektrons beträgt **$1{,}9 \cdot 10^{-19}$ As** und man nennt sie **Elementar**ladung. Ein Proton ist **positiv** geladen und ein Elektron **negativ** geladen. Fast alle Kräfte der Natur lassen sich auf **elektromagnetische** Kräfte zurückführen.

Ü 2.2

Ü 2.3 $\Delta Q = I_1 \Delta t_1 + I_2 \Delta t_2 = 0{,}5\text{ A} \cdot 300\text{ s} + 0{,}3\text{ A} \cdot 1200\text{ s} + 0{,}1\text{ A} \cdot 3000 = 810\text{ As} = 0{,}225\text{ Ah}$

Ü 2.4 $\Delta Q = I_1 \Delta t_1 + I_2 \Delta t_2 = 12\text{ A} \cdot 1{,}5\text{ h} + 8\text{ A} \cdot 2\text{ h} = 34\text{ Ah} = 122 \cdot 10^{3}\text{ As}$

Ü 2.5 $\Delta t = \frac{\Delta Q}{I} = \frac{45\text{ Ah}}{300\text{ A}} = 0{,}15\text{h} = 9\text{ min}$

Ü 2.6 $\Delta Q = I \cdot \Delta t \Rightarrow I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{5\text{ C}}{10^{-4}\text{ s}} = 50\text{ kA}$

Ü 2.7 $\Delta Q = 0{,}167$ As

Ü 2.8

a) U
b) R
c) kV, mV und V
d) parallel zum Widerstand
e) mit einem Multimeter oder mit einem Amperemeter
f) dem Strömungswiderstand
g) entsteht Wärme bzw. geben Elektronen an das Atomgitter Energie ab.
h) ist aus Metall bzw. hat einen Widerstand im µA-Bereich

Eine richtige Antwort zählt einen Punkt. Für falsche Antworten ziehst du einen Punkt ab. Damit sind maximal 12 Punkte möglich. (Ab 10 Punkte bist du wirklich kompetent!)

Ü 2.9 $U = I \cdot R = 5{,}8 \cdot 10^{-3} A \cdot 470\ \Omega = 2{,}73\ V$

Ü 2.10 $R = \frac{U}{I} = \frac{9\ V}{0{,}03\ A} = 300\ \Omega$

$G = 1/R = 3{,}33\ mS$

Ü 2.11 $U = I \cdot R = 2\ mA \cdot 10\ k\Omega = 20\ V$

Ü 2.12 $U = I \cdot R = 1100\ A \cdot 5 \cdot 10^{-6}\ \Omega = 5{,}5\ mV$
(Die Schrittspannung ist so klein, dass die Krähe vermutlich davon nichts spürt.)

Ü 2.13

a) Vergleiche dein Ergebnis mit dem Experiment aus Abb. 34.2
b) $R_{blau} = 15\ k\Omega$; $R_{Grün} = 3{,}3\ k\Omega$

Ü 2.14 Individuelle Bearbeitung, daher keine allgemein gültige Lösung angebbar.

Ü 2.15

a) $\omega = 2\pi \cdot 0{,}415\ Hz = 2{,}61\ s^{-1}$ $T = 2{,}41\ s$
b) –

Ü 2.16 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}5\ s} = 0{,}285\ Hz$

$\omega = 2\pi f = 1{,}8 s^{-1}$

Ü 2.17 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0{,}121\ Hz} = 8{,}26\ s$

Ü 2.18 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8\ m/s}{50\ Hz} = 6 \cdot 10^6\ m \sim 6\,000\ km$

Ü 2.19 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340\ m/s}{440\ Hz} = 0{,}773\ m$

Ü 2.20 $f_1 = \frac{c}{\sim} = \frac{3 \cdot 10^8\ m/s}{0{,}118\ m} = 2{,}54\ GHz$

bzw.: $f = 1{,}92\ GHz$

Ü 2.21 $x = 2{,}4\ mm$

Ü 2.22 *The depth of water is only 3 m!*

Ü 2.23 Vermutlich ist nicht reines Helium sondern ein Luft-Heliumgemisch für die Abweichung verantwortlich.

Ü 2.24 Werden periodische **Druck**schwankungen in einem Ausbreitungs**medium** weitergeleitet, dann spricht man von Schall. Wenn ein Klang hoch klingt, dann ist der Wert der **Frequenz** in kHz hoch. Die Schalleistung, die pro Fläche von einer Schallquelle ausgeht, wird **Intensität** genannt. Mit der Einheit dB misst man den **Schallpegel**. Ob Schall laut oder leise empfunden wird hängt nicht nur von der Intensität, sondern auch von der **Frequenz** des Lärms ab. Die Schallintensität nimmt mit dem Abstand zur Quelle **ab**. Um welchen Wert nimmt die Schallintensität ab, wenn man den Abstand zur Quelle verdoppelt? Antwort: **ein Viertel**.

Ü 2.25

L ~ 104 dB; That's very loud, but for short time not dangerous.

Ü 2.26 $f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8\ m/s}{400 \cdot 10^{-9}\ m} = 7{,}5 \cdot 10^{14}\ Hz$

bzw.: $f_2 = 3{,}75 \cdot 10^{14}\ Hz$

Ü 2.27 $s = c \cdot t = 3 \cdot 10^8\ m/s \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3\,600\ s = 9{,}461 \cdot 10^{15}\ m$
ca. 60 000 AE

Ü 2.28 $\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{1\ cm^2}{(1\ m)^2} = 10^{-4}\ sr$

Ü 2.29 Unter der Annahme, dass der Projektor 25 m entfernt ist:
$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{600\ m^2}{(25\ m)^2} = 0{,}96\ sr$

Ü 2.30 $\Phi = P \cdot \eta = 200\ lm$; $I = 159\ cd$

Ü 2.31

a) den Lichtstrom in Lumen beschrieben
b) die Beleuchtungsstärke in Lux
c) 4π bzw. 12,57 sr
d) Du behauptest, dass es Kerzenlampen gibt, die energieeffizient arbeiten, aber leider noch teuer sind.
e) ein Maß für den Farbeindruck einer Lichtquelle.

Ü 2.32 $Q = 25\ MJ$

Ü 2.33 100 l heißes Wasser, 150 l kaltes Wasser

Ü 2.34 $l = 1506\ m$

Ü 2.35 $\alpha = 6 \cdot 10^{-5}\ K^{-1}$

Ü 2.36 $I = 0{,}06\ W/m^2$

Ü 2.37 Zuerst $\lambda = 4{,}16 \cdot 10^{-2}\ W/mK \Rightarrow Q = 2{,}2\ MJ$

Ü 2.38 $Q = 84{,}4\ MJ$

Mechanik

Ü 3.1 $v = 14{,}4$ km/h

Ü 3.2 $t = 2{,}56$ s

Ü 3.3 $v = 1670$ km/h

Ü 3.4 $v = 107\,589$ km/h $\Rightarrow s \approx 2{,}6$ Mill. km

Ü 3.5 $v \approx 72\,000$ km/h;
etwa 10 Milliarden km jenseits der Plutobahn

Ü 3.6
a) $v = 10{,}08$ m/s $= 36{,}3$ km/h
b) $v = 7{,}16$ m/s $= 25{,}78$ km/h
c) $v = 5{,}41$ m/s $= 19{,}47$ m/s

Ü 3.7
a) Beide Pkw sind gleich lang unterwegs $\Rightarrow$

$\frac{s_1}{v_1} = \frac{s_2}{v_2}$; mit $s_1 + s_2 = 200$ folgt:

$s_1 = 80$ km, $s_2 = 120$ km; sie treffen einander nach 2 h Fahrzeit

b)

Ü 3.8 (1) ruht in B
(2) + (3) sind gleich schnell und bewegen sich von A nach B
(4) fährt langsamer als (2) und (3) und beginnt früher zu fahren
(5) fährt von B nach A

Ü 3.9

Ü 3.10 $s = 15$ km

Ü 3.11
a) 30 Längen
b) $v = 1{,}715$ m/s $= 6{,}174$ km/h
c) $t = 0{,}58$ s
d) $s = 0{,}9$ m; $t = 0{,}52$ s

Ü 3.12 $t = 36$ s; Gepard $s = 720$ m, Gazelle $s = 540$ m

Ü 3.13
a) Gerhard ist schneller; $t_G = 80$ min; $t_K = 100$ min;
b) $v = 30$ km/h
c)

Ü 3.14 $s_1 = 50$ m $s_2 = 100$ m $s_3 = 0$ m $s_4 = 150$ m $s_5 = 0$ m
$s_6 = -25$ m $s_7 = -125$ m $s_8 = -50$ m $s_9 = 100$ m
Die Geschwindigkeiten sind zahlenmäßig gleich mit der Einheit m/s.

Ü 3.15 $u = 159{,}4$ m $\Rightarrow v = 11{,}22$ m/s $= 40{,}4$ km/h

Ü 3.16
a) $t = 103$ s $= 1$ min 43 s;
b) für die erste Teilstrecke braucht der Fahrer $t = 75{,}24$ s; daher bleiben ihm für die restlichen 200 m 27,76 s $\Rightarrow v = 7{,}2$ m/s $= 26$ km/h

Ü 3.17

Alkaid	$9{,}6 \cdot 10^{14}$ km
Phecda	$8 \cdot 10^{14}$ km
Alkor	$7{,}7 \cdot 10^{14}$ km
Merak	$7{,}5 \cdot 10^{14}$ km
Dubhe	$1{,}2 \cdot 10^{15}$ km

Ü 3.18 $v = 14{,}7$ m/s

Ü 3.19 Zeit $t \approx 400$ a (von 1600 bis heute) $\Rightarrow$
$s = 6{,}3 \cdot 10^{13}$ km ≈ 6 Lj

Ü 3.20 Maximale Flugstrecke = westliche bzw. östliche Route $\approx 8\,000$ km $\Rightarrow t \approx 200$ h

Ü 3.21 $a = 1{,}85$ m/s^2 $s = 208$ m

Ü 3.22 $a = 2{,}38$ m/s^2

Ü 3.23 Mit etwa 50 km/h

Ü 3.24 $a = 0{,}77$ m/s^2

Ü 3.25 $a = 3{,}4$ m/s^2, $s = 169$ m

Ü 3.26 $a = (-)556$ m/s^2 $= 56$ g; $s = 2{,}8$ m

Ü 3.27 $t = 20$ s

Ü 3.28 $a = -1{,}1$ m/s^2, $t = 30$ s

Ü 3.29 $v = 60$ m/s $= 216$ km/h

Ü 3.30 $a = 5\,556$ m/s^2;
Weg d innerhalb von einer Sekunde: $d = 2{,}8$ m

Ü 3.31
a) $t = 23{,}15$ s,
b) $s = 80{,}38$ m,
c) $a = 8{,}55$ m/s^2,
d) $t = 5{,}18$ s
e) $t_{ges} = 100$ s,
f) $s_{ges} = 598$ m

Ü 3.32 $a = 3{,}09$ m/s^2

Ü 3.33 Geschwindigkeit nach 4200 m:
$v = 6{,}36$ m/s, $a = 0{,}053$ m/s^2, $t = 173$ s

Ü 3.34 b)

Ü 3.35
- **a)** falsch
- **b)** falsch
- **c)** richtig
- **d)** richtig

Ü 3.36
- **a)** sich der Betrag oder die Richtung der Geschwindigkeit ändert
- **b)** nach 2 s der vierfache Weg zurück gelegt wurde
- **c)** je steiler die Gerade ist, umso größer die Beschleunigung
- **d)** die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit

Ü 3.37 **Gleichförmige Bewegung**

s, t, a, t

Körper ruht

v, t, a, t

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

s, t, a, t

Gleichförmige Bewegung („zurück")

v, t, a, t

Ü 3.38 GUT; OHM; BAR; WEG; EXA

Ü 3.39 $t = 8{,}8$ s; $v = 86$ m/s $= 310$ km/h

Ü 3.40 $h = 66{,}5$ m

Ü 3.41 $t = 3{,}76$ s; Fehler: 4,8 %

Ü 3.42 $a = -229$ m/s^2

Ü 3.43 $a = 98$ m/s^2, $t = 0{,}47$ s

Ü 3.44 $s = 2{,}27$ m

Ü 3.45 $h = 3{,}26$ m; ja

Ü 3.46 $g = 16$ m/s^2

Ü 3.47 $h = 57{,}17$ m

Ü 3.48

Ü 3.49 Folgende Aussagen gelten: Die Punkte eines rotierenden Körpers beschreiben Kreisbahnen. Die Bahnen der Punkte eines rotierenden Körpers sind verschieden lang.

Ü 3.50 Stundenzeiger: $\omega = 0{,}000145\ s^{-1}$
Minutenzeiger: $\omega = 0{,}00174\ s^{-1}$
Sekundenzeiger: $\omega = 0{,}105\ s^{-1}$

Ü 3.51 $\omega = 0{,}0000727\ s^{-1}$

Ü 3.52 $\omega = 188{,}5\ s^{-1}$

Ü 3.53
- **a)** $n = 300$ U/min
- **b)** $f = 5$ Hz
- **c)** $T = 0{,}2$ s
- **d)** $\omega = 31{,}4\ s^{-1}$
- **e)** $\varphi = 81{,}68$ rad $= 4680° = 13$ Umdrehungen

Ü 3.54 f und ω werden verdoppelt, r bleibt gleich, T wird halbiert

Ü 3.55 $\alpha = 288\ s^{-2}$

Ü 3.56 $\alpha = (-)70\ s^{-2}$

Ü 3.57 $v = 1668$ km/h

Ü 3.58
- **a)** 16,42 Umdrehungen in einer Sekunde
- **b)** 985 Umdrehungen in einer Minute

Ü 3.59 mit $v = r \cdot \omega = r \cdot 2\pi f \Rightarrow r = 80$ km

Ü 3.60 $r = 2{,}5$ m

Ü 3.61 Vorderrad $n = 251$ U/min, Hinterrad $n = 159$ U/min

Ü 3.62 Er fährt langsamer; r und v sind direkt proportional

Ü 3.63 $v = 0{,}16$ m/s

Ü 3.64 $8 \cdot 10^{13}$ mal

Ü 3.65 b), c)

Ü 3.66
- **a)** $\alpha = -30{,}9\ s^{-2}$
- **b)** $N \approx 32$ Umdrehungen

Dynamik

Ü 4.1 $V = 8{,}5$ cm^3; $a = 2$ cm

Ü 4.2 100 g Bronze bestehen aus 70 g Cu und 30 g Sn;
$V_{cu} = 7{,}9$ cm^3, $V_{sn} = 4{,}1$ cm$^3 \Rightarrow$
$V_{bronze} = 12$ cm$^3 \Rightarrow \rho = 8300$ kg/m^3

Ü 4.3 $V = 44{,}6$ m^3; $m = 8$ kg

Ü 4.4 $\rho = 8500$ kg/m^3

Ü 4.5 $\rho = 4{,}8 \cdot 10^{17}$ kg/m^3

Ü 4.6 $m = 28$ kg

Ü 4.7 $V \approx 70\ dm^3$

Ü 4.8 $V = 8290\ m^3$; Seitenkante $a = 20{,}2\ m$

Ü 4.9 $m = 40\ t$

Ü 4.10 $a = 2\ m/s^2$

Ü 4.11 $F = 13\ GN$

Ü 4.12
a) $a = 0{,}25\ m/s^2$; $\Delta v = 2{,}5\ m/s$
b) $F = 100\ N$; $\Delta v = 0{,}5\ m/s$

Ü 4.13
a) $F = 90\ N$
b) $F = 48\ N$
c) $F = 120\ N$
d) $F = 225\ N$
e) $F = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2\ s} = 300\ N$

Ü 4.14 $a = (–)\ 116\ m/s^2$; $F = 8{,}7\ kN$

Ü 4.15 $a = (–)\ 198\ m/s^2 = (–)\ 20\ g$; $F_1 = 155\ kN$; $F_2 = 9{,}9\ kN$

Ü 4.16 **a)**

b) (i) $a = 8{,}7\ m/s^2$; **(ii)** $a = 5\ m/s^2$

Ü 4.17 b)

Ü 4.18 d)

Ü 4.19 a), c)

Ü 4.20 a), d)

Ü 4.21
a) falsch
b) richtig
c) falsch
d) falsch
e) richtig
f) falsch
g) falsch

Ü 4.22 Die Vorstellung, dass die Kraft, die der Kanonenkugel „mitgegeben" wird, aufgebraucht ist und sie daher plötzlich herab fällt, ist falsch.

Ü 4.23 $V_{geschätzt} = 10 \cdot 7 \cdot 3 = 210\ m^3$; $F_G = 2700\ N$

Ü 4.24 a) $F_G = 353\ 880\ N$; b) $F_G = 352\ 080\ N$
c) $\frac{\Delta F}{F} \cdot 100 = (–)\ 0{,}51\ \%$

Ü 4.25
a) $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 5\ m/s^2$; Trägheitskraft $F_T = 400\ N$;
Bremskraft $F = F_T + F_G = 1200\ N$
Hier wurde unter a) angenommen, dass die Bremskraft konstant bleibt. In der Praxis verändert sich bei der Verzögerung aber die Kraft, da sich der Luftwiderstand mit der Geschwindigkeit ändert!

b) die Gewichtskraft

Ü 4.26 **a)** $F_1 = 1{,}51\ kN$ **b)** $F_2 = 252\ N$

Ü 4.27 $ma = \mu mg \Rightarrow a = 6\ m/s^2$; $t = 8{,}5\ s$; $s = 208\ m$;
$a = \mu g = 5{,}89\ m/s^2$
Bremszeit $t = 8{,}49\ s$; Bremsweg $s = 212\ m$

Ü 4.28
a) $F_H = 235\ kN$; $a = 0{,}144\ m/s^2$; $t = 193{,}5\ s$
b) $F_R = 48{,}3\ kN$; $F = F_H - F_R = 187{,}1\ kN$;
$a = 0{,}114\ m/s^2$, $t = 244\ s$

Ü 4.29 a)

Ü 4.30 $F_N = 12{,}3\ N$

Ü 4.31 ≈ 0,5 Umdrehungen pro Sekunde

Ü 4.32 $\tan\alpha = \frac{v^2}{g \cdot r} \Rightarrow \alpha = 34°$

Ü 4.33 $F_2 = F_1 \cdot \frac{r_1}{r_2}$; $F_2 = 1{,}17 \cdot F_1$

Ü 4.34
a) $\omega = 0{,}3\ s^{-1}$
b) $T = 21\ s$
c) $v = 32\ m/s$

Ü 4.35
a) Aus $h = \frac{g}{2} \cdot t^2$ folgt $t = 0{,}319\ s$;
mit $v = \frac{s}{t}$ folgt $v = 6{,}26\ m/s$;
$\omega = 6{,}26\ s – 1$; $f = 1\ Hz$

Ü 4.36 am oberstem Punkt gilt: $F_z > G \Rightarrow v > r \cdot g$;
mit $r \approx 4\ m$ folgt $v > 6{,}26\ m/s = 22{,}5\ km/h$

Ü 4.37 $v = 6\ m/s$

Ü 4.38 $k = 35{,}3\ kN / cm$

Ü 4.39
a) $\Delta x = 4{,}3\ cm$
b) $\Delta x = 2{,}2\ cm$
c) $\Delta x = 8{,}7\ cm$

Ü 4.40 Grüne Gerade: $k = 2{,}0\ N/m$
Blaue Gerade: $k = 5{,}0\ N/m$

Ü 4.41 $m = 0{,}00554\ kg$;
$J_1 = 3{,}4 \cdot 10^{-8}\ kgm^2$;
$J_2 = 1{,}2 \cdot 10^{-5}\ kgm^2 \Rightarrow \frac{J_1}{J_2} = 1 : 347$

Ü 4.42 Beachte, dass sich auch die Masse ändert!
$m = \rho \frac{4r^3\pi}{3} \cdot r$; $J = \frac{2}{5} \rho \frac{4r^3\pi}{3} \cdot r^2$;
somit ändert sich J mit der 5ten Potenz des Radius, daher muss sich der Radius um $\sqrt[5]{2}$ vergrößern, damit sich das Trägheitsmoment verdoppelt.

Ü 4.43 **a)** Um das 2^5-fache = 32-fache
b) gar nicht

Ü 4.44 M = 150 Nm

Ü 4.45 Abstand von der Last: x = 0,46 m

Ü 4.46 Es handelt sich um einen zweiarmigen Hebel. Es gilt: „Esel · Abstand + vordere Last · Abstand = hintere Last · Abstand". Die Last hinter der Achse soll 2/3 der Gesamtmasse betragen (sonst würde der Esel nicht so hoch gehoben werden).
$2500 \cdot 1{,}5 + (x/3) \cdot 0{,}5 = (2x/3) \cdot 0{,}5$;
Last L = 22 500 N

Ü 4.47 $m_B = 1{,}2$ kg, $m_c = 0{,}05$ kg

Energie und Impuls

Ü 5.1 $m = 18 \cdot 104$ kg; W = 0,35 GJ

Ü 5.2 $W = E_{pot} = 809$ J; m = 47 mg Schokolade (so viel wie eine Messerspitze Salz)

Ü 5.3 h = 185 m

Ü 5.4 s = vt = 12 km;
F = mgμ = 73,6 kN;
W = Fs = 883 MJ

Ü 5.5 $W = m\frac{v^2}{2} = 0{,}5\text{ kg}\,\frac{(26{,}4\text{ m/s})^2}{2} = 174{,}1\text{ J}$

Ü 5.6
2) Kraft verrichtet nicht
3) immer Arbeit, da manchmal
1) die Kraft im rechten Winkel
8) zu einem zurückgelegten Weg steht.
11) In solch einem Fall muss es
10) andere Kräfte geben, unter deren
4) Einwirkung der Weg zurückgelegt wird.
12) Hubarbeit wird verrichtet,
7) wenn gegen die Gewichtskraft
14) eine Höhendifferenz
5) überwunden wird.

Müllhaufen:
9) dies nennt man die Goldene Regel
6) deren Einheit Kilojoule nach
13) einem englischen Bierbrauer

Ü 5.7 **a)** Energie wird bei der Arbeit umgewandelt.
b) 0,4 MJ bzw. 400 KJ
c) Die Fläche unter dem Graphen kann die Einheit Joule haben.
Im Kraft-Weg-Diagramm ist der Flächeninhalt unter dem Graphen die verrichtete Arbeit.
Im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm ist der Flächeninhalt unter dem Graphen der zurückgelegte Weg.
d) Man spart Energie, da man beim defensiven Fahren nicht bei jeder Kreuzung aus dem Stillstand beschleunigen muss.
Unfälle von defensiven Fahrern und Fahrerinnen sind seltener und verursachen weniger Schaden.
e) Braunkohle/Windenergie
Eine richtige Antwort zählt einen Punkt, für falsche Antworten ziehst du einen Punkt ab, das ergibt maximal 11 Punkte.

Ü 5.8 Angenommen: m = 50 kg; h = 7m;
$E_{pot} = mgh = 3{,}4$ kJ

Ü 5.9 $m = \frac{E_{pot}}{gh} \approx 7{,}1$ t; also etwa 7 000 Liter pro Minute

Ü 5.10 $E_{pot} = 3\,922{,}7$ J; near the pole: $E_{pot}' = 3932{,}8$ J

Ü 5.11 $E_{Lisa} = 20 \cdot 10^3\text{ kg}\,\frac{(8{,}33\text{ m/s})^2}{2} = 694$ kJ;
$E_{Leo} = 2{,}4$ kJ

Ü 5.12 $E_{kin} = 185$ kJ

Ü 5.13 $E_{Fede} = 30 \cdot 800\,\frac{\text{N}}{\text{m}}\,\frac{(0{,}5\text{ m})^2}{2} = 3{,}0$ kJ

Ü 5.14 $P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t} =$

$\frac{6 \cdot 10^6\text{ kg} \cdot 9{,}81\text{ m/s}^2 \cdot 50\text{ m}}{1\text{ s}} = 2{,}9$ GW

Ü 5.15 $P = mav \Rightarrow a_{LKW} = \frac{P}{mv} =$

$\frac{285\text{ kW}}{40 \cdot 10^3\text{ kg} \cdot 2{,}778\text{ m/s}^2} = 2{,}57\text{ m/s}^2$

$a = 1{,}8\text{ m/s}^2$

Voraussetzung:
1) Die Motorleistung bei der verwendeten Übersetzung (bzw. der Geschwindigkeit) ist ausreichend und kann an die Antriebsräder gebracht werden.
2) Die Haft-Reibungskräfte an den Antriebsrädern sind groß genug.

Ü 5.16 $P = \frac{mgh}{t} \Rightarrow m = \frac{Pt}{gh} = \frac{150 \cdot 10^3\text{ W } 60\text{ s}}{9{,}81\text{ m/s}^2 \cdot 70\text{ m}} =$
$13{,}1 \cdot 10^3$ kg

Ca. 13 000 Liter fließen pro Minute durch die Turbine.

Ü 5.17

$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 2{,}22\ m/s^2$

$P_1 = mav = 1\,200\ kg \cdot 2{,}22\ m/s^2 \cdot 27{,}8\ m/s = 74\ kW$

$P_2 = 103{,}6\ kW$

Die mittlere Leistung ergibt sich mit 88,8 kW.

Ü 5.18

a) $P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{2\,000\ W}{230\ V} = 8{,}70\ A$

$P = \frac{W}{t} \Rightarrow W = E = P \cdot t =$

$2\,000\ W \cdot 12 \cdot 60\ s = 1{,}44\ MJ$

b) $E = \frac{1{,}44\ MJ}{3{,}6 \cdot 10^6} = 0{,}40\ kWh$

Ü 5.19

$P_{ges} = 4\,650\ W$

$I = \frac{P}{U} = 20{,}2\ A$

Die Sicherung muss ausschalten!

Ü 5.20

$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{1 W \cdot 10 \cdot 10^3\,\Omega} = 100\ V$

Ü 5.21

$P = \frac{E}{t} \Rightarrow E = Pt = 100\ W \cdot 3\,600\ s = 360\ kJ = 0{,}1\ kWh$

Ü 5.22

$P = 1\ kW$; $\eta = 67{,}9\ \%$ Beim Losfahren des Tores muss die Leistung größer sein, je nach Tormasse und Beschleunigung.

Ü 5.23

$\eta = 0{,}25\ \%$; $P_{Zu} = 20\ kW$; $P_{Nutz} = 5\ kW$

Ü 5.24

$P_{Nutz} = 1{,}78\ kW$; $m = 725\ kg$; 725 Liter Wasser werden pro Minute hoch gepumpt. (Es steht allerdings keine weitere Leistung für einen Druckaufbau in dieser Höhe zur Verfügung!)

Ü 5.25

a) $P_{Zu} = 150\ kW \cdot$

b) $\eta_g = \eta_1 \cdot \eta_2 \Rightarrow \eta_1 = \frac{\eta_g}{\eta_2} = 0{,}375$

Der Wirkungsgrad des Motors beträgt 37,5 %.

c) Die Verlustleistung beträgt:

$P_v = 45\ kW \cdot (1 - 0{,}30) = 31{,}5\ kW$

Im Winter beträgt die Verlustleistung:

$P_{VW} = 29{,}5\ kW$;

$1 - \eta_{Winter} = \frac{P_{VW}}{45\ kW} = 0{,}656$

Der Gesamtwirkungsgrad verbessert sich auf $\eta = 0{,}34\ \%$.

Ü 5.26

$F \cdot \Delta t = m \cdot v \Rightarrow F = \frac{0{,}01\ kg \cdot 850\ m/s}{7 \cdot 10^{-3}\ s} = 1\,214\ N$

Ca. F = 1,2 kN drücken auf die Schulter

Ü 5.27

$v = 0{,}05\ m/s$

Ü 5.28

$E_{kin1} + E_{pot1} = E_{kin2} + E_{pot2}$

$E_{kin1} + 0 = 0 + E_{pot2}$

$h = \frac{v^2}{2\,g}$; $h = 3{,}5\ m$

Ü 5.29

$E_{kin1} + E_{pot1} = E_{kin2} + E_{pot2}$

$0 + E_{pot1} = E_{kin2} + 0$

$v = 10\ m/s = 36\ km/h$

Ü 5.30

a) $E_{kin1} + E_{pot1} = E_{kin2} + E_{pot2}$

$0 + E_{pot1} = E_{kin2} + 0$

$v \sim 100\ m/s = 360\ km/h$

b) E = 49 GJ, dies entspricht der Sprengkraft von mehr als 12 Tonnen TNT.

Ü 5.31

a) $m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} = m \cdot g \cdot h_2 + m \cdot \frac{v_2^2}{2}$

$v_2 = \sqrt{(g \cdot h_1 - g \cdot h_2 + \frac{v_1^2}{2}) \cdot 2}$

$v_2 = \sqrt{(9{,}81\ \frac{m}{s^2}\ (40\ m - 15\ m) + \frac{(22\ m/s)^2}{2}) \cdot 2}$

$v_2 = 31{,}4\ m/s$

In einer Höhe von 5 m hat das Fahrzeug eine Geschwindigkeit von ca. 113 km/h.

b) $m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot \frac{v_1^2}{2} = m \cdot g \cdot h_2 + 0$

$h_2 = (g \cdot h_1 + \frac{v_1^2}{2})\ \frac{1}{g} =$

$(9{,}81\ \frac{m}{s^2}\ 40\ m + \frac{(22\ m/s)^2}{2}) \cdot \frac{1}{9{,}81\ m/s^2} = 65{,}2\ m$

Ü 5.32

speed $v = 26{,}2\ m/s$

Ü 5.33

In einem abgeschlossenen System wird nach außen keine **Energie** abgegeben oder **aufgenommen**. Abwärme ist keine „verlorengegangene" Energie, sondern eine nicht **nutzbare** Energie. Eine Maschine, die Arbeit verrichtet ohne Energie zu verbrauchen nennt man **„Perpetuum Mobile"**. Solch eine Maschine ist **unmöglich**.

Ü 5.34

$F \cdot \Delta t = m \cdot v \Rightarrow v = \frac{F \cdot \Delta t}{m} = \frac{1\ kN \cdot 60\ s}{600\ kg} = 100\ m/s$

Ü 5.35

$m_1 \cdot \Delta v_1 = m_2 \cdot \Delta v_2 \Rightarrow m_1 = \frac{m_2 \cdot \Delta v_2}{\Delta v_1} =$

$\frac{80\ kg \cdot 40\,000\ m/s}{3\,600\ m/s} = 889\ kg$

Gesamtmasse: ca. 890 kg (Da die Sonde in dieser Zeit um die Treibstoffmasse leichter wird, könnte man noch mehr Nutzmasse mitnehmen!)

Ü 5.36

$w_{2A} = \frac{(m_2 \cdot m_1)v_2 + 2\,m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{0 + 2 \cdot 0{,}7\ kg \cdot 10\ m/s}{0{,}757\ kg}$

$= 18{,}49\ m/s$

Die Ballgeschwindigkeit beim leichten Tennisschläger beträgt 66,6 km/h; die vom schweren: 67,2 km/h

Ü 5.37

a) $w = \frac{m_T \cdot v_T + m_A \cdot v_A}{m_T + m_A}$

$= \frac{110\text{ kg} \cdot 6{,}94\text{ m/s} + 68\text{ kg} \cdot (-4{,}17\text{ m/s})}{178\text{ kg}} =$

$-0{,}936$ m/s

Beide gleiten mit der Geschwindigkeit von etwa 3,4 km/h in Richtung des leichteren Andy weiter!

b) $U = m_T \frac{v_T^2}{2} + m_A \frac{v_A^2}{2} - m_T \frac{w^2}{2} - m_A \frac{w^2}{2} = 3{,}16\text{ kJ}$

Ü 5.38 Die Geschwindigkeit des schweren Balls ist 13,4 m/s; die des leichten: 26,3 m/s. Beide fliegen weiter in dieselbe Richtung.

Ü 5.39

$w = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_S \cdot (0)}{m_1 + m_S} \Rightarrow v_1 = \frac{w\,(m_1 + m_S)}{m_1} =$

$= \frac{1{,}1\text{ m/s} \cdot 5{,}01\text{ kg}}{0{,}010\text{ kg}} = 551\text{ m/s}$

Ü 5.40

a) Wagen 1: $v_1 = 3$ m /3 s = 1 m/s;
Wagen 2: $v_2 = 0$m/s

b) Wagen 1: $w_1 = 0{,}6$ m /1 s = 0,6 m/s;
Wagen 2: $w_2 = 1{,}6$ m /1 s = 1,6 m/s

c) Aus den Stoßgesetzen aber auch aus dem Impulserhaltungssatz erhält man durch Formelumstellung und Einsetzen obiger Ergebnisse: Die Masse des zweiten Wagens beträgt 1,25 t.

Ü 5.41 *All steel balls have the same mass.*

Ü 5.42 Antwort A: Die baulichen Maßnahmen „schlucken" Verformungsenergie und haben die Wirkung eines „Stoßdämpfers".

Gravitation

Ü 6.1

a) übereinandergelagerte Kreisbahnen (Epizyklen)

b) Ellipsenbahnen

Ü 6.2 nicht ganz exakt/mittels Ellipsenbahnen

Ü 6.3 In den Naturwissenschaften gibt es keine ewigen Wahrheiten.
Beschreiben zwei Theorien die Gegebenheiten gleich gut, dann ist die einfachere Theorie der schwierigeren vorzuziehen.

Ü 6.4

$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} =$

$6{,}67 \cdot 10^{-11}\text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \; \frac{5{,}99 \cdot 10^{24}\text{ kg} \cdot 7{,}4 \cdot 10^{22}\text{ kg}}{(384 \cdot 10^6\text{ m})^2} =$

$2 \cdot 10^{20}$ N

Ü 6.5

aus $m_2 \cdot g = G \frac{m_g \cdot m_2}{r^2}$ = ergibt sich $g = G \frac{m_E}{r^2}$ und

in Zahlenwerten:

$g_{Mond} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \; \frac{7{,}4 \cdot 10^{22}\text{ kg}}{(1{,}738 \cdot 10^6\text{ m})^2} =$

1,63 m/s²

Dies entspricht etwa 1/6 der Fallbeschleunigung g auf der Erde.

Ü 6.6 Die Erde und Max drücken gegenseitig aufeinander mit der gleichen Gewichtskraft von Max Mühe.

Ü 6.7

$m_{Mond} \cdot 6{,}67 \cdot \frac{v^2}{r} = G \frac{m_{Mond} \cdot m_{Jupiter}}{r^2} \Rightarrow m_{Mond} = \frac{v^2 \cdot r}{G}$

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{1{,}77 \cdot 24 \cdot 3\,600\text{ s}} = 41{,}1 \cdot 10^{-6}\text{s}^{-1}$

$v = \omega \cdot r = 41{,}1 \cdot 10^{-6}\text{s}^{-1} \cdot 0{,}422 \cdot 10^9\text{ m} = 17{,}3\text{ km/s}$

Mit Zahlenwerten ergibt sich als Masse für das Zentralgestirn:

$m_{Jupiter} = \frac{(17\,300\text{ m/s})^2 \cdot 0{,}422 \cdot 10^9\text{ m}}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\text{ Nm}^2/\text{kg}^2} = 1{,}9 \cdot 10^{27}\text{ kg}$

Ü 6.8

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{5\,460\text{ s}} = 1{,}15 \cdot 10^{-3}\text{s}^{-1}$

Zentrifugalkraft und Gravitationskraft sind gleich groß:

$m_{Satellit} \cdot \frac{v^2}{r} = G \frac{m_{Satellit} \cdot m_{Erde}}{r^2}$

Setzt man $v = \omega \cdot r$ ein und kürzt die Satellitenmasse ergibt sich:

$\frac{\omega^2 \cdot r^2}{r} = G \frac{m_{Erde}}{r^2} \Rightarrow r = \sqrt[3]{G \frac{m_{Erde}}{\omega^2}}$

Mit Zahlen:

$r = \sqrt[3]{6{,}67 \cdot 10^{-11}\text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \; \frac{6 \cdot 10^{24}\text{ kg}}{(1{,}15 \cdot 10^{-3}\text{ s}^{-1})^2}} =$

$6{,}71 \cdot 10^6$ m

Von diesem Radius muss noch der Erdradius (6380 km) abgezogen werden. ISS kreist in etwa 331 km Höhe. Die Höhe der ISS nimmt im Lauf der Zeit ab (Luftwiderstand ist nicht vernachlässigbar klein). Die ISS muss von Zeit zu Zeit wieder angehoben werden.

Ü 6.9 Ein Satellit in einem höheren Orbit benötigt **mehr** Zeit für einen Umlauf. Unsere Planeten sind **natürliche** Satelliten, sie bewegen sich um die **Sonne**. Beim freien Fall und auf einer **Satellitenbahn** herrscht Schwere**losigkeit**. Geostationäre Satelliten drehen sich mit derselben **Winkelgeschwindigkeit** wie die **Erde**. Fernsehsatelliten findet man auf einer Bahn über dem Äquator. Der Mittelpunkt kreisförmiger Satellitenbahnen liegt immer im **Zentrum** des **Zentral**gestirns. Die Gravitationskraft zwischen zwei Massen nimmt mit dem **Quadrat** des Radius **ab**.

Hydro- und Aerostatik

Ü 7.1 $A = \frac{F}{p} = \frac{5\,600 \cdot 10^3 \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2}{320 \cdot 10^5 \text{ Pa}} = 1{,}75 \text{ m}^2$
Ein Stempel hat eine Fläche von 0,096 m^2, daher sind 19 Stempel notwendig.

Ü 7.2 $\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{d_1^2}{4}}{\frac{4}{d_2^2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{10{,}5}{2{,}5}\right)^2 =$ 17,6

Ü 7.3 $F_1 = F_2 \frac{A_1}{A_2} = 2\,000 \text{ N}$

Ü 7.4 $p = \rho \cdot g \cdot h = 78 \text{ kPa}$

Ü 7.5 p = 14 kPa; F = 1,4 N;
(Ich glaub schon, dass du das schaffst, nur wie lange ist die Frage …)

Ü 7.6 $h = \frac{p}{\rho g} = 6\,116 \text{ m}$
$A = 0{,}086 \text{ m}^2$; F = 5,13 MN

Ü 7.7
a) Druck in einer Flüssigkeit wirkt in alle Richtungen gleich stark.
Druck in einer Flüssigkeit nimmt mit der Wassertiefe linear zu.
b) 90 bar bzw. 9 MPa
c) Hydraulikauflagen dienen zur Kraftverstärkung.
Das hydraulische Prinzip funktioniert nicht mit Gasen, da diese kompressibel sind.
Es waren also 6 Punkte maximal möglich, für falsche Antworten ziehst du einen Punkt ab.

Ü 7.8 $V = 100 \text{ m}^3$; $F_A = 0{,}98$ MN; die Gewichtskraft des Kellers ist geringfügig leichter, daher besteht die Frau Baumeisterin berechtigt auf eine größere Betonmasse!

Ü 7.9 $F_A = 4{,}1$ MN;
$V = \frac{F_A}{\rho \cdot g} = 533 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

Ü 7.10 F ist in beiden Fällen gleich! Da die Auftriebskräfte beim Schwimmen immer gleich den Gewichtskräften sind. Allerdings ist das verdrängte Volumen in Salzwasser um 20 % geringer.

Ü 7.11 *The crown is not of pure gold, because the density is not enough with 16,95 kg/dm³.*

Ü 7.12 $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{180 \text{ m}^3}{60 \text{ s}} = 3 \text{ m}^3/\text{s}$
$v = \frac{I}{A} = \frac{3 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{(0{,}6 \text{ m})^2\pi}{4}} = 10{,}6 \text{ m/s}$

Ü 7.13
a) $I = 36 \text{ l/min} = 0{,}6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
b) $v = \frac{I}{A} = 1{,}2 \text{ m/s}$

Ü 7.14 $\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \rightarrow v_2 = \frac{v_1 \cdot d_1^2}{d_2^2} =$
$4 \text{ m/s} \frac{3^2}{1{,}4^2} = 18{,}4 \text{ m/s}$

Ü 7.15 $d_2 = \sqrt{\frac{v_1 d_1^2}{v_2}} = 1{,}1 \text{ mm}$

Ü 7.16 $p_{Dyn} = \rho \frac{v^2}{2} = 0{,}78 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{(181 \text{ m/s})^2}{2} = 12{,}8 \text{ kPa}$

Ü 7.17 $p_{Dyn} = \rho \frac{v^2}{2} = 1{,}3 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{(30{,}6 \text{ m/s})^2}{2} = 609 \text{ Pa}$
$F = p \cdot A = 609 \text{ Pa} \cdot 9{,}2 \text{ m}^2 = 5{,}6 \text{ kN}$

Ü 7.18
a) Der dynamische Druck steht in einem quadratischen Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit.
Der Gesamtdruck ist unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Er wird in Strömungsrichtung gemessen.
b) die Geschwindigkeit relativ zur umgebenden Luftschicht.
c) Mit Hilfe des Paradoxons kann geklärt werden, warum es bei Sturm manchmal ganze Dächer abhebt.
Die Bernoulligleichung beruht auf dem EES.
Es waren also 5 Punkte maximal möglich, für falsche Antworten ziehst du einen Punkt ab.

Ü 7.19 Individuelle Bearbeitung, daher keine allgemein gültige Lösung angebbar.

Ü 7.20 $F_w = c_w \cdot \frac{d^2\pi}{4} \cdot \rho \frac{v^2}{2} =$
$1{,}3 \frac{(0{,}9 \text{ m})^2\pi}{4} \cdot 1{,}3 \text{ kg/m}^3 \frac{(50 \text{ m/s})^2}{2} = 1{,}3 \text{ kN}$

Ü 7.21 $\frac{\Delta F}{F} 100 = \frac{v_1^2 - v_2^2}{v_1^2} 100 = \frac{150^2 - 80^2}{150^2} 100 = 71 \%$
(Alle Konstanten kürzen sich aus dem Kräfteverhältnis heraus!)

Ü 7.22 $F_w = c_w \cdot A \cdot \rho \frac{v^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2F}{c\rho A}} = 25 \text{ m/s}$

Ü 7.23
a) $F_w = c_w \cdot A \cdot \rho \frac{v^2}{2} = 1{,}8 \text{ kN}$
b) $W = F \cdot s = (1\,800\text{N} + 1\,500 \text{ N}) \cdot 3 \cdot 10^5\text{m} = 0{,}99 \text{ GJ}$

Ü 7.24 $P = F \cdot v = c_w \cdot A \cdot \rho \frac{v^3}{2} = 26 \text{ kW}$

Ü 7.25
a) Wenn der aerodynamische Auftrieb größer als die Gewichtskraft ist, dann steigt das Flugzeug.
b) von der Fläche des Auftriebskörpers abhängig
vom Anstiegswinkel des Flügelprofils abhängig
c) gibt es keinen Auftrieb/steht das Flugzeug am Flughafen
d) nach unten
e) Dann spricht man von Abtrieb
Die Wurfparabel wird flacher.
Es waren also 8 Punkte maximal möglich, für falsche Antworten ziehst du einen Punkt ab.

Griechisches Alphabet (Druckbuchstaben)

Α α	Alpha	a	Η η	Eta	e	Ν ν	Ny	n	Τ τ	Tau	t
Β β	Beta	b	Θ ϑ	Theta	th	Ξ ξ	Xi	x	Υ υ	Ypsilon	y
Γ γ	Gamma	g	Ι ι	Jota	i	Ο ο	Omikron	o	Φ ϕ	Phi	ph
Δ δ	Delta	d	Κ κ	Kappa	k	Π π	Pi	p	Χ χ	Chi	ch
Ε ε	Epsilon	e	Λ λ	Lambda	l	Ρ ρ	Rho	r	Ψ ψ	Psi	ps
Ζ ζ	Zeta	z	Μ μ	My	m	Σ σ	Sigma	s	Ω ω	Omega	o

Vorsätze und Potenzen

E	**Exa**	1 000 000 000 000 000 000	10^{18}
P	**Peta**	1 000 000 000 000 000	10^{15}
T	**Tera**	1 000 000 000 000	10^{12}
G	**Giga**	1 000 000 000	10^{9}
M	**Mega**	1 000 000	10^{6}
k	**kilo**	1 000	10^{3}
h	**Hekto**	100	10^{2}
da	**deka**	10	10^{1}
d	**deci**	0,1	10^{-1}
c	**centi**	0,01	10^{-2}
m	**milli**	0,001	10^{-3}
µ	**mikro**	0,000 001	10^{-6}
n	**nano**	0,000 000 001	10^{-9}
p	**piko**	0,000 000 000 001	10^{-12}
f	**femto**	0,000 000 000 000 001	10^{-15}
a	**atto**	0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}

Abgeleitete Einheiten

Ebener Winkel	α	Radiant	*rad*	1 rad = 1m/m
Frequenz	f	Hertz	*Hz*	1 Hz = 1 /s
Kraft	F	Newton	*N*	1 N = 1 kgm/s^2
Druck	p	Pascal	*Pa*	1 Pa = 1 N/m^2
Arbeit	W	Joule	*J*	1 J = 1 Nm
Leistung	P	Watt	*W*	1 W = 1 J/s
elektr. Ladung	Q	Coulomb	*C*	1 C = 1As
elektr. Spannung	U	Volt	*V*	1 V = 1 W/A
elektr. Kapazität	C	Farad	*F*	1 F = 1 As/V
elektr. Widerstand	R	Ohm	*Ω*	1 Ω = 1 V/A
Induktivität	L	Henry	*H*	1 H = 1 Vs/A
Lichtstrom	Φ	Lumen	*lm*	1 lm = 1cd.sr
Beleuchtungsstärke	E	Lux	*lx*	1 lx = 1 lm/m^2
Aktivität	A	Becquerel	*Bq*	1 Bq = 1/s
Energiedosis	D	Gray	*Gy*	1 Gy = 1 J/kg
Raumwinkel	ω	Steradiant	*sr*	1 sr = $1m^2/m^2$

Wichtige physikalische Konstanten und Werte

Lichtgeschwindigkeit	$c_o = 299\,792\,458$ m/s
Gravitationskonstante	$G = 6{,}6726 \cdot 10^{-11}\ m^3/kgs^2$
Elementarladung	$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
Planck´sches Wirkungsquantum	$h = 6{,}626 \cdot 10^{-36}$ Js
Erdfallbeschleunigung	$g = 9{,}806\ m/s^2$
Solarkonstante	$s = 1368\ W/m^2$
Masse des Protons	$m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ kg
Masse des Neutrons	$m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ kg
Masse des Elektrons	$m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ kg
Masse der Erde	$m_E = 5{,}98 \times 10^{24}$ kg
Masse des Monds	$m_M = 7{,}35.10^{22}$ kg
Masse der Sonne	$m_S = 1{,}99 \times 10^{30}$ kg
Erdradius, Äquator	$r_Ä = 6378$ km
Erdradius, Pol	$r_P = 6357$ km
Radius des Monds	$r_M = 1738$ km
Radius der Sonne	$r_S = 700\,000$ km
Abstand Erde – Mond	$d = 384\,400$ km
Abstand Erde – Sonne	$D = 149{,}6 \cdot 10^6$ km = 1 AE
AE … Astronomische Einheit	

Gravitation

Größe		Einheit		Formel
Gravitationskraft	F	Newton	N	$\vec{F} = -G\frac{M \cdot m}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$
potentielle Energie im Gravitationsfeld	E_p	Joule	J	$E_p = -G\frac{M \cdot m}{r}$

Mathematische Symbole

a ≈ b: a angenähert gleich b

a ~ b: a ist proportional b

a>>b: a sehr groß gegen b

Mechanik

Größe		Einheit		Formel
Länge	l	Meter	m	Basisgröße
Flächeninhalt	A	–	m^2	$A \sim l^2$
Volumen	V	–	m^3	$V \sim l^3$
Zeit	t	Sekunde	s	Basisgröße
Masse	m	Kilogramm	kg	Basisgröße
Dichte	$\rho\eta$	–	$kg \cdot m^{-3}$	$\rho = \frac{m}{V}$
Stoffmenge	n	Mol	mol	Basisgröße
Weg	$\vec{s}$	Meter	m·	Basisgröße
Geschwindigkeit	$\vec{v}$	–	$m \cdot s^{-1}$	$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$
Beschleunigung	$\vec{a}$	–	$m \cdot s^{-2}$	$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$
Kraft	$\vec{F}$	Newton	N	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$
Arbeit	W	Joule	J	$W = F \cdot s$
Energie	E	Joule	J	$E = E_k + E_p$
Leistung	P	Watt	W	$P = \frac{W}{t}$
Wirkungsgrad	η	–	–	$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{E_2}{E_1}$
Impuls	$\vec{p}$	–	N · s	$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
Antrieb	$\vec{S}$	–	N · s	$\vec{S} = \vec{F} \cdot \Delta t$
Winkelgeschwindigkeit	ω	–	s^{-1}	$\omega = \frac{\Delta\rho}{\Delta t}$
Bahngeschw.	v	–	$m \cdot s^{-1}$	$v = r \cdot \omega$
Winkelbeschleunigung	α	–	s^{-2}	$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$
Zentripetalkraft	F	Newton	N	$F = \frac{m \cdot v^2}{r}$
Drehimpuls	L	–	J · s	$L = m \cdot v \cdot r$
Trägheitsmoment	J	–	$kg \cdot m^2$	$J \sim m \cdot r^2$
Drehmoment	M	–	N · m	$M = F \cdot r$

Sachwortregister

Der neue Naturwissenschafts-Lehrgang für HTL

Von Technikern für Techniker!

Entspricht den aktuellen kompetenzorientierten Lehrplänen!

Durchgerechnete Beispiele, attraktive Übungen und ein ansprechendes Layout helfen, das Erlernte anzuwenden und zu festigen.

- Anwendungsorientiert: Vorgerechnete Musterbeispiele und zahlreiche Übungen ermöglichen einen gezielten Erwerb und eine Überprüfung der Grundkompetenzen.
- Ansprechend: Zielgruppengerechte grafische Gestaltung und eine verständliche Sprache erleichtern das Lesen und Lernen.
- Aktuell: Kulturelle, wirtschaftliche und gesellschaftliche Themen geben Anregungen zum verantwortlichen Handeln.

www.hpt.at

Naturwissenschaften HTL: 1 Jg. Grundlagen der Physik

Schulbuchnummer: 155016

ISBN 978-3-230-03498-4

Wien, 1. Auflage

Alle Drucke der 1. Auflage können im Unterricht nebeneinander verwendet werden.

9783230 034984